



UFRJ

Felipe Nepomuceno de Oliveira

**GEOLOGIA ESTRUTURAL E ESTRATIGRAFIA DA REGIÃO DO CERRO
RAYOSO, BACIA NEUQUÉN, ARGENTINA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
Geologia**

UFRJ
Rio de Janeiro
2011



UFRJ

Felipe Nepomuceno de Oliveira

**GEOLOGIA ESTRUTURAL E ESTRATIGRAFIA NA REGIÃO DO CERRO
RAYOSO, CRETÁCEO DA BACIA NEUQUÉN, ARGENTINA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadores: André Ribeiro e

José Carlos Sícoli Seoane

UFRJ

Rio de Janeiro

2011

Oliveira, Felipe Nepomuceno

Geologia estrutural e estratigrafia na região do Cerro Rayoso, Bacia de Neuquén, Cretáceo da Bacia de Neuquén, Argentina / Felipe Nepomuceno de Oliveira - Rio de Janeiro: UFRJ / IGEO, 2011.

xv, 68 pp.

Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2011.

Orientador: André Ribeiro e co-orientador: José Carlos Sícoli Seoane

1. Geologia Estrutural 2. Estratigrafia 3. Bacia Neuquén
4. Cretáceo 5. Argentina

Felipe Nepomuceno de Oliveira

**GEOLOGIA ESTRUTURAL E ESTRATIGRAFIA NA REGIÃO DO CERRO
RAYOSO, CRETÁCEO DA BACIA NEUQUÉN, ARGENTINA**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador: André Ribeiro e

Co-orientador: José Carlos Sícoli Seoane

Aprovada em:

Por:

Orientador: André Ribeiro (UFRJ)

Renata da Silva Schmitt (UFRJ)

Rudolph Allard Johannes Trouw (UFRJ)

Dedicada à
Aguinaldo Nepomuceno Marques Jr.,
Lucia Beatriz Ferreira de Oliveira,
Clarice Oliveira Nepomuceno e
Vinícius Oliveira Nepomuceno.

Agradeço aos geólogos Mario Araújo e Paulo Santarém pelo apoio recebido e pelos conhecimentos valiosos de geologia estrutural que aprendi durante meu estágio no CENPES, PETROBRÁS. Nesse estágio fui apresentado à geologia lindíssima da Bacia de Neuquén de onde surgiu a idéia de realizar esse trabalho.

Agradeço aos orientadores e amigos André Ribeiro e José Carlos Sícoli Seoane pelos importantes ensinamentos passados ao longo de toda graduação e muitas oportunidades de ir para o campo, que foram essenciais na minha formação como geólogo. Agradeço também pelo incentivo e confiança depositada, e por embarcarem em tamanha empreitada. Nossa viagem de carro para a Patagônia foi uma das experiências mais marcantes que já tive e com certeza ficará registrada como uma das melhores lembranças dos tempos de graduação.

Obrigado também a Renata Schmitt pelo apoio e a Rudolph Trouw por tudo que me foi ensinado nos últimos anos trabalhando como monitor de suas disciplinas.

Agradeço finalmente a todos meus amigos de faculdade, principalmente a Maria Taryn Relvas que foi minha parceira de campo nesse trabalho e a Clara Ferrer Costa, companheira nos demais campos da faculdade e de muitas aventuras!

Resumo

NEPOMUCENO, Felipe O. **Geologia Estrutural e Estratigrafia na região do Cerro Rayoso, Cretáceo da Bacia Neuquén, Argentina.** 2011. xv, 68p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

No Cerro Rayoso e adjacências, a sul de Chos Malal na pré-cordilheira Argentina, depósitos cretáceos da Bacia Neuquén deformados em regime tectônico de crosta rasa registram a transição de uma bacia de retro arco para bacia de ante-país. Esta transição geotectônica, interpretada como resultado da diminuição do ângulo de subducção da placa proto-pacífica sob a placa Sul-Americana, produziu faixas de dobras e falhas, entre elas o Cinturão Agrio onde se situa a área focada. Nesta área ocorrem falhas reversas de traço N-S com *splays* NE-SW e dobras associadas com vergência para oeste e eixos com caimento suave para NNW ou SSE. A estrutura marcante é um braqui-anticlinal em caixa assimétrico com vergência para oeste que cavalga outro antiformal em caixa. A deformação foi acompanhada por sedimentação sin-tectônica dando origem aos depósitos dos Grupos Bajada del Agrio e Neuquén, com deformação cada vez mais suave que seu embasamento e fonte, representada na área pelas sucessões do grupo Mendoza. Estes três grupos estão representados na área por doze unidades de mapeamento que abrangem o intervalo do Neocomiano no Eocretáceo até o Cenomaniano no Neocretáceo. A unidade mais antiga é a Formação Agrio do Grupo Mendoza, com três membros mapeáveis: Pilmatué com pelito cinza escuro *offshore* e intercalações de arenito e coquina (tempestitos?), Avilé com arenitos fluviais representando regressão forçada e, no topo, Água de La Mula, também com pelito cinza *offshore*, arenito e coquina. Sobre a Formação Agrio ocorrem as formações Huitrín e Rayoso do Grupo Bajada del Agrio. Na Formação Huitrín foram mapeadas duas unidades, inferior com arenitos fluviais e eólicos e, superior com evaporito, carbonato e pelito. Sobre esta aparece a Formação Rayoso com as unidades inferior formada por arenitos litorâneos, média com evaporito, pelito e carbonato de laguna rasa e superior com arenitos e pelitos também litorâneos. No topo da sucessão aparece o Grupo Neuquén com três unidades de arenitos fluviais e eólicos cobrindo em discordância angular os depósitos da Formação Rayoso. O mapeamento geológico foi feito com auxílio de modelos 3D e *hillshade* e um mosaico georreferenciado de 300 cenas em zoom de detalhe do *Google Earth* 6.1.

Abstract

NEPOMUCENO, Felipe O. **Structural Geology and Stratigraphy of the Cerro Rayoso region, Cretaceous of the Neuquén Basin, Argentina.** 2011. xv, 68p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

At the Cerro Rayoso and adjacencies, south to Chos Malal in the Argentine Andean foothills, Cretaceous deposits of the Neuquén Basin deformed under shallow crust tectonic regime record the transition of a back-arc to foreland basin. This geotectonic transition, interpreted as the result of shallowing of subduction angle of the proto-pacific plate under the South America plate, produced several fold and thrust belts, including the Agrio Fold Belt where the study area is inserted. In this area there are N-S trending reverse faults with NE-SW splays and associated folds verging to the west. The folds show axis with low double plunge to NNW and SSE. The main structure is the Cerro Rayoso huge asymmetric box fold that overthrust another box fold. The deformation was associated with syn-tectonic sedimentation represented by the deposits of the Bajada del Agrio and Neuquén Groups with increasingly reduction of deformation away from their basement and source, the Mendoza Group successions. These three groups are represented by twelve mappable units that cover the time interval of the Neocomian in the Early Cretaceous to the Cenomanian in the Late Cretaceous. The three oldest units are the mappable members of the Agrio Formation: Pilmatué composed of offshore dark grey pelite with sandstone and coquina (tempestite?) intercalations, Avilé characterized by fluvial sandstones representing a forced regression and, on top, the Água de La Mula also constituted of offshore dark grey pelites, sandstone and coquina. Above the Agrio Formation occurs the Huitrín and Rayoso formations of the Bajada del Agrio Group. On the Huitrín Formation two units were mapped, an inferior one composed of aeolian and fluvial sandstones and a superior made of evaporite, carbonate and pelite. Above appears the Rayoso Formation constituted of a lower littoraneous sandstones unit, a middle lagoon evaporite-pelite-carbonate unit and a superior unit composed of littoraneous sandstone and pelite. On the top of the succession appears the Neuquén Group with three aeolian fluvial sandstone units, the lowermost one covers on angular unconformity the Rayoso Formation. The geological mapping was supported by hillshade and 3D models, and by a georeferenced mosaic made of 300 scenes under detailed zoom on Google Earth 6.1.

Figura 1	Mapa político da Argentina. A província de Neuquén, local da área de estudo, está destacada.	2
Figura 2	Mapa de estradas da província de Neuquén. O acesso da área a partir da cidade de Chos Malal se dá seguindo a sul pela rota 40 seguindo. A área de estudo se encontra aproximadamente delimitada pelo retângulo vermelho.	3
Figura 3	Localização geográfica, limites e principais estruturas da Bacia Neuquén (modificado de Yagupsky, 2009). O retângulo marca a área estudada.	5
Figura 4	Carta estratigráfica da Bacia Neuquén, modificado de Veiga et al., 1995. O intervalo estudado está marcado em vermelho.	6
Figura 5	Seção sísmica através da dorsal de Huicul, segundo Pángaro et al. 2006b, in Yagupsky, 2009. A Formação Rayoso ocorre entre os grupos Mendoza e Neuquén (amarelo na figura).	7
Figura 6	Restauração de seção no Cinturão Malargue segundo Giambiagi et al. (2008). Notar importante deformação <i>thick-skinned</i> durante a inversão da bacia e consequente formação do cinturão de dobras e falhas.	8
Figura 7	Imagem LANSAT mostrando os setores interno e externo do Cinturão Agrio baseado em Cobbold e Rossello (2003), Zapata e Folguera (2005). Diferenças no estilo estrutural dos setores interno (inner sector na figura) e externo (outer sector) do cinturão são mostradas nas seções sísmica (b) e balanceada (c) de Zapata e Folguera (2005).	10
Figura 8	Modelo tridimensional mostrando seção balanceada na parte norte do Cinturão Agrio. Modelo feito no programa GOCAD, interpretação com auxílio de Mario Araújo e Paulo Santarém, CENPES, Petrobrás.	11
Figura 9	Restauração de zona triangular de parte setor externo do orógeno - <i>outer sector</i> mostrado na figura 5. Segundo Zapata et al., 2002. Note que a tectônica <i>thick-skinned</i> somente ocorreu no Mioceno.	12
Figura 10	Evolução geotectônica da Bacia Neuquén nos setores ao sul e ao norte do Lineamento Cortaderas. A área estudada situa-se ao sul do Carta estratigráfica da Bacia Neuquén, modificado de Veiga et al., 1995. O intervalo estudado está marcado em vermelho.	14, 15

Figura 11	Mosaico de imagens <i>Quickbird</i> retiradas do <i>Google Earth</i> dividido em faixas. Nota-se o efeito da névoa provocando aspecto embaçado na faixa oeste em (a). Em (b) essa foi tratada ganhando mais nitidez, porém a diferença de tonalidade persiste.	17
Figura 12	Detalhe no mosaico de imagens mostrando erro de georreferenciamento nativo do <i>Google Earth</i> .	17

Figura 13	Modelos de sombreamento formados a partir de sol em azimute de 40° (a) e de 340° (b), realçando diferentes feições.	18
Figura 14	Modelo de sombreamento mostrando efeito do sol posicionado em azimutes de 40° e 340° simultaneamente realçando os dois conjuntos de lineamentos principais da área (a). Imagem sobreposta com transparência no modelo de sombreamento anterior, ganhando aspecto de profundidade (b).	19
Figura 15	Modelo 3D construído usando os valores de elevação do SRTM, mostrando mapa geológico sobre imagem de satélite.	19
Figura 16	Foto mostrando vertente da montanha que acompanha a atitude das camadas formando feição geomorfológica <i>dip-slope</i> . A camada morrom escura apresenta na foto cerca de 200m de comprimento do topo a base.	20
Figura 17	Polígonos delimitando algumas superfícies formadas por topo de camadas com grande área exposta.	21
Figura 18	Mapa de declividade. Os valores da legenda se encontram em graus.	21
Figura 20	Imagem mostrando proximidade dos valores de declividade máxima nas superfícies com o valor medido no campo em (a) e orientações dos lineamentos de declividade máxima compatíveis com medida de campo (b).	23
Figura 21	Coluna estratigráfica local comparada com a coluna de Leanza (2003). Em cores as unidades de mapeamento neste trabalho – vide mapa geológico (anexo 1).	24
Figura 22	Figura E0 - Modelo mostrando a paleogeografia da bacia e configuração dos continentes no tempo. Em (a) deposição da Formação Agrio (verde escuro e claro) em bacia de retro-arco. obs: a paleogeografia global mostrada em (A) corresponde ao final do Jurássico. Em (b) deposição dos sedimentos continentais do Grupo Neuquén em bacia de ante-país. Os blocos diagramas foram modificados de Howell et al (2005) e os modelos paleogeograficos globais foram produzidos por Ron Blakey (http://cpgeosystems.com /index.html) e inseridos no <i>Google Earth</i> pela comunidade de usuários do <i>software</i> .	25
Figura 23	Argilito cinza e bancos de arenito do Membro Pilmatué, unidade da base da Formação Agrio no Cerro Rayoso.	27
Figura 24	Argilito e arenito do Membro Pilmatué, unidade basal da Formação Agrio, sobrepostos por arenito do Membro Avilé no Cerro Rayoso.	27
Figura 25	Corte lateral em estratificação cruzada acanalada de possível origem fluvial em arenito do Membro Avilé, Formação Agrio no Cerro Rayoso.	28
Figura 26	Argilito e bancos de arenito do Membro Agua de La Mula em	29

	contato brusco sobre arenitos Avilé. Flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso.	
Figura 27	Bancos de arenito (a) e de arenito e coquina (b) intercalados em argilito cinza. Membro Agua de La Mula, Formação Agrio no flanco leste do Cerro Rayoso.	30
Figura 28	Camadas de coquina que ocorrem no Membro Agua de La Mula, unidade superior, Formação Agrio no flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso. Escala 6cm.	30
Figura 29	Amonita em banco de coquina no Membro Agua de La Mula, Formação Agrio no flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso. Escala 6cm.	31
Figura 30	Bancos de arenitos e intercalações de pelito topo do Membro Agua de La Mula. Acima, arenitos da Formação Huitrin. Canion no Arroyo Pichi Neuquén.	31
Figura 31	Predomínio arenito no topo do Membro Agua de La Mula formando unidade distinta, um quarto na Formação Agrio. Canion no Arroyo Pichi Neuquén.	32
Figura 32	Carta cronoestratigráfica da Formação Huitrin segundo Veiga et al., 2003. O Membro Trancoso Inferior corresponde a Unidade Inferior e os membros Trancoso Superior e La Tosca a unidade superior no presente trabalho.	33
Figura 33	Arenitos basais da Formação Huitrín - Membro Trancoso Inferior em discordância erosiva sobre pelitos e arenitos da Formação Agrio. Flanco leste do Cerro Rayoso.	34
Figura 34	Camadas de arenito com estratificação cruzada acanalada na base da Formação Huitrín. Flanco leste do Cerro Rayoso.	35
Figura 35	Estratificação cruzada de grande porte, de possível origem eólica, em arenitos no topo do Membro Trancoso Inferior, Formação Huitrín no Cerro Rayoso.	35
Figura 36	Paisagem típica dos pelitos e evaporitos da unidade superior da Formação Huitrín: afloramentos brancos e rosados formando relevo arrasado. As rochas são alteradas e parcialmente encobertas por detritos modernos. Ao fundo na foto afloram unidades da Formação Rayoso e do Grupo Neuquén em tom vermelho.	36
Figura 37	Pelitos rosados e acinzentos e bancos de evaporitos, topo da Formação Huitrín na parte sul da área.	37
Figura 38	Pelitos e bancos de evaporitos no topo da Formação Huitrín. Ao fundo a serra sustentada por arenitos da base da Formação Rayoso.	37
Figura 39	Siltitos carbonáticos em camadas delgadas maciças com separações de argilito. Formação Huitrín na área do Cerro Rayoso.	38
Figura 40	Ciclos grano e estrato crescentes formados por estratos compostos por dois tipos de fácies: arenitos com marcas de	40

	onda e arenitos com estratificação cruzada. Simplificado de perfil detalhado na base da Formação Rayoso no Rio Pichi Neuquén.	
Figura 41	Padrão de interferência em marcas de crista sinuosa. Arenito da unidade basal da Formação Rayoso no Rio Pichi Neuquén.	41
Figura 42	Lineação de partição em arenitos na base da Formação Rayoso no Rio Pichi Neruquén.	41
Figura 43	Bioturbação em arenito basal da Formação Rayoso em um serrote a norte do Rio Pichi Neuquén.	42
Figura 44	Estratificação cruzada em arenitos basais da Formação Rayoso próximo em serrote a norte do Rio Pichi Neuquén (a) e na área do Cerro Rayoso (b).	43
Figura 45	Paisagem típica da unidade Rayoso médio – pelitos alterados e parcialmente cobertos por depósitos modernos.	44
Figura 46	Unidade superior da Formação Rayoso no norte da área. Na base predomina pelito, na parte média proporções semelhantes de arenitos e pelitos, no topo bancos arenito. Na foto se destaca um banco de evaporito e falha reversa cortando um anticlinal suave.	45
Figura 47	Arenitos avermelhados da base do Grupo Neuquén em discordância angular sobre a unidade de topo da Formação Rayoso. Serrote 1 km a leste do Cerro Rayoso.	46
Figura 48	Estratificação cruzada de pequeno (a) e médio (b) portes em arenitos na base do Grupo Neuquén.	47
Figura 49	Conglomerado polimítico sobre lente delgada de rocha carbonática. Fácies locais na base do Grupo Neuquén.	48
Figura 50	Formação Candeleros – a unidade inferior em tom vermelho claro cobrindo Formação Rayoso e sobreposta pela unidade superior em tom vermelho escuro (a). As unidades inferior e superior da Fm. Candeleros, e no serrote ao fundo os arenitos claros da Formação Huincul (b).	49
Figura 51	Estratificação cruzada em arenito grosso na unidade média do Grupo Neuquén.	50
Figura 52	Flanco oeste do braquianticlinal em caixa do Cerro Rayoso com aparente vergência para oeste (a) e camadas reviradas no flanco leste da estrutura (b). Localização das fotografias na figura GE2.	51, 52
Figura 53	Mapa geológico no <i>datum Campo Inchauspe</i> (a) e seções geológicas transversais as principais estruturas da área (b).	53, 54
Figura 54	Estereograma de igual área, hemisfério sul, mostrando pólos de planos de acamamento, sem discriminar tipos de dobras – suaves, <i>chevron</i> e caixa.	55
Figura 55	Dobras em <i>chevron</i> em siltito carbonático na base da Formação Hutrín.	55
Figura 56	Modelo teórico para dobramento em <i>chevron</i> produzido pelo	56

	mecanismo de <i>flexural slip</i> , segundo Twiss and Moores (2006).	
Figura 57	Brecha autóctone ao longo do acamamento em siltito carbonático na base da Formação Huitrín.	57
Figura 58	Superfície com ressaltos, estrias e fibras de carbonato, em pelito carbonoso da Formação Agrio. As estruturas lineares orientam-se no sentido do mergulho do acamamento.	
Figura 59	A falha principal da área com alto mergulho local para leste, colocando em contato camada de gesso da Formação Huitrín sobre arenito da Formação Rayoso.	58
Figura 60	Detalhe do mapa geológico mostrando falha normal ou transcorrente sinistral com componente secundário reverso, deslocando unidades das formações Huitrín, Rayoso e do Grupo Neuquen.	59
Figura 61	Par conjugado de fraturas de alto ângulo com rumo N15E e N70E ao lado da falha principal da área de rumo N-S. Arenito Rayoso na parte central da área.	50
Figura 62	Zonas de <i>tension veins</i> nordeste-sudoeste e leste-oeste (paralela ao martelo) indicando cisalhamento dextral e sinistral, respectivamente (a). Detalhe de veio na zona dextral (b).	61
Figura 63	Movimentos esperados em reativação de falhas de traço NE-SW por compressão NE - SW. Notar que tanto em (a), quanto em (b) a direção de compressão máxima é nordeste-sudoeste. Entretanto, uma pequena variação nessa direção provocaria mudança de sentido de movimentação na falha.	62
Figura 64	Modelo simplificado mostrando a origem das principais estruturas da área em relação às duas fases de deformação. Em preto se encontram as estruturas formadas durante a primeira fase de deformação (sigma 1 aproximadamente E-W) e em vermelho encontram as estruturas e reativações originadas na segunda fase NE-SW.	63

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Tabela de Figuras.....	ix
Sumário.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo.....	1
1.2 Metodologia.....	1
1.3 Localização geográfica da área estudada.....	2
2. GEOLOGIA REGIONAL.....	4
2.1 Compartimentação Geotectônica e principais estruturas.....	6
2.1.1. Dorsal de Huicul	7
2.1.2. Cinturões de dobramento.....	8
2.1.2.1 Cinturão Agrio.....	9
2.1.3. O Lineamento Cortaderas.....	13
3. GEOPROCESSAMENTO.....	16
3.1.2 Mosaico de Imagens.....	16
3.1.3 Produtos gerados através do SRTM.....	16
3.2 Cálculo de atitudes a partir de <i>Dip-Slopes</i>	20
4. ESTRATIGRAFIA.....	24
4.1. Introdução.....	24
4.2. Estratigrafia local – Cerro Rayoso e adjacências.....	26
4.2.1. Formação Agrio – Grupo Mendoza.....	26
4.2.1.1. Membro inferior, Pilmatué.....	26
4.2.1.2. Membro Avilé.....	28
4.2.1.3. Membro superior - Agua de La Mula.....	29
4.2.2. Formação Huitrín – Grupo Bajada del Agrio.....	32
4.2.2.1. Unidade inferior – Membro Troncoso Inferior.....	33
4.2.2.2. Unidade superior – membros Troncoso Superior, La Tosca e Salinas.....	36
4.2.3. Formação Rayoso - Grupo Bajada del Agrio.....	39
4.2.3.1. Unidade Rayoso Inferior.....	39
4.2.3.2. Unidade Rayoso Média.....	43
	xiv

4.2.3.3. Unidade Rayoso Superior.....	44
4.2.4. Formação Candeleros - Grupo Neuquén.....	45
4.2.4.1. Formação Candeleros - Unidade Inferior.....	46
4.2.4.2. Formação Candeleros - Unidade Superior.....	48
4.2.4.3. Formação Huicul - Grupo Neuquén.....	50
5. GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	51
5.1 Dobras.....	51
5.2 Falhas.....	57
5.3. Juntas e veios.....	59
5.4 Fases de deformação.....	60
6. CONCLUSÕES E DISCUSSÃO.....	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo

O objetivo do trabalho foi produzir um mapa geológico detalhado na escala 1:40.000 da região do Cerro Rayoso para caracterizar a geologia estrutural e estratigrafia da área. A fim de otimizar o trabalho de campo restrito foram usadas técnicas de geoprocessamento muito úteis em áreas com rica exposição de afloramentos como a localidade estudada.

1.2 Metodologia

A metodologia consistiu em análise bibliográfica, trabalhos de campo e de geoprocessamento. O resultado é um mapa geológico na escala 1:40.000 de uma área de cerca de 600 km² produzido em três etapas.

Na primeira etapa, pré-campo, foram confeccionados um mapa de curvas de nível e um modelo de sombreamento *hillshade* a partir de uma imagem SRTM da área. Além disso, foi realizado um mosaico de imagens Quickbird a partir da captura de 300 telas de cenas detalhadas da área no programa *Google Earth*. O resultado foi uma imagem de alta resolução espacial que foi georeferenciada no programa ArcGIS. As curvas de nível, obtidas anteriormente, foram colocadas sobre essa imagem. O conjunto foi impresso em quatro segmentos na escala 1:10.000 e interpretado usando conceitos clássicos de fotogeologia. Ao final dessa etapa foi produzido um mapa pré-campo que serviu como base para os trabalhos de campo.

A segunda etapa do trabalho consistiu em 9 dias de campo durante o mês de Maio de 2011 com objetivo de compreender o arcabouço estutural e estratigráfico da área, e corrigir o mapa. Com esse fim, foram confeccionados perfis estratigráficos atravessando as diversas texturas mapeadas na imagem de satélite. Foram também tomadas medidas estruturais dispersas ao longo da região e visitadas localidades chaves para o entendimento da geologia estrutural da área. O *datum* usado na campanha foi o WGS84, com coordenadas geodésicas.

A partir dos dados obtidos nos trabalhos de campo teve início a terceira e última etapa. O mapa foi inteiramente corrigido no ArcGIS com base nos dados de campo em uma fotointerpretação mais minuciosa - em certas áreas foi usado até zoom proporcional à escala 1:5.000. O resultado foi um mapa geológico detalhado impresso na escala 1:40.000. Foi elaborado um modelo 3D a partir do mapa geológico e do modelo digital de elevação. Se deu início ao desenvolvimento de uma metodologia nova

para calcular atitudes de camadas a partir de *dip-slopes* que precisa ainda ser aprimorada e foram confeccionadas também seções geológicas. Ao fim foi elaborado o presente relatório. As demais figuras foram elaboradas no programa CorelDraw X5 e os estereogramas no programa OpenStereo (Grohmann et al. 2011).

1.3 Localização geográfica da área estudada

A área estudada localiza-se no oeste da Argentina na provincia de Neuquén próximo a fronteira com o Chile (Figura 1), no noroeste da Patagonia. O acesso a partir da cidade de Chos Malal, a mais próxima da área, é pela *ruta* 40 (Figura 2).



Figura1- Mapa político da Argentina. A provincia de Neuquén, local da área de estudo, está destacada. (fonte:http://www.zonu.com/argentina_maps/Argentina_Political_Map_3.htm)



Figura 2- Mapa de estradas da província de Neuquén. O acesso da área a partir da cidade de Chos Malal se dá seguindo a sul pela rota 40 seguindo. A área de estudo se encontra aproximadamente delimitada pelo retângulo vermelho. *Modificado de <http://www.grufoos.com/IMG/jpg/mapa-rutas-neuquen.jpg>*

2. Geologia Regional

A Bacia Neuquén possui forma triangular, cobre cerca de 120.000 km² e têm cerca de 8000m de registro estratigráfico. É limitada a sudeste pelo Maciço Norte Patagônico, a nordeste pelo Maciço Sierra Pintada e a oeste pelo atual arco vulcânico da cordilheira andina (Fig. 3).

A Bacia Neuquén teve início no final do Triássico como um rifte continental (Legarreta e Uliana, 1991 - apud Giambiagi et al. 2008). Sedimentos marinhos e continentais foram depositados em depocentros isolados que eram hemigrábens (Vergani et al. 1995).

No início do Jurássico, os sedimentos passaram a ser depositados numa bacia de retro-arco, formada durante o desenvolvimento do arco magmático andino, como resultado de subducção da placa proto-pacífica sob a margem oeste do Gondwana (Francesse et al., 2003; apud Howell et al., 2005). Um longo período de subsidência termal pós-rifte concomitante a extensão gerou conexão da bacia de retro-arco com o proto-oceano pacífico através de passagens marinhas no sistema vulcânico do arco (Spatelli et al. 2000; Macdonald et al. 2003; apud Howell et al.). Nesta fase foram depositados mais de 4000 m de sedimentos em toda a bacia (Vergani et al. 2005), formando uma série de ciclos transgressivos e regressivos, representados por unidades dos grupos Cuyo, Lotena e Mendoza (Fig. 4), onde se encontram os principais geradores e reservatórios petrolíferos da bacia.

No Neo-Cretáceo o ângulo de subducção da placa Pacífica se tornou menor, houve incremento na velocidade de convergência (Howell et al., 2005), provavelmente relacionado à ruptura do Gondwana, o que acarretou migração do arco magmático em direção ao continente. O resultado foi um regime compressivo que gerou até cerca de 60km de encurtamento crustal (Introcso et. al 1992; Ramos 1999b; apud Howell et al. 2005) invertendo estruturas extensionais anteriores (Vergani et al., 1995). Com isso, foram formados cinturões de dobramento e empurrão gerando relevo e fechando a conexão da Bacia Neuquén com o oceano Pacífico. Nesta fase a bacia de ante-país recém formada por subsidência flexural abrigou cerca de 2000m de sedimentos continentais derivados da erosão de um orógeno N-S, do qual faz parte o Cinturão Agrio, onde se localiza a área estudada.

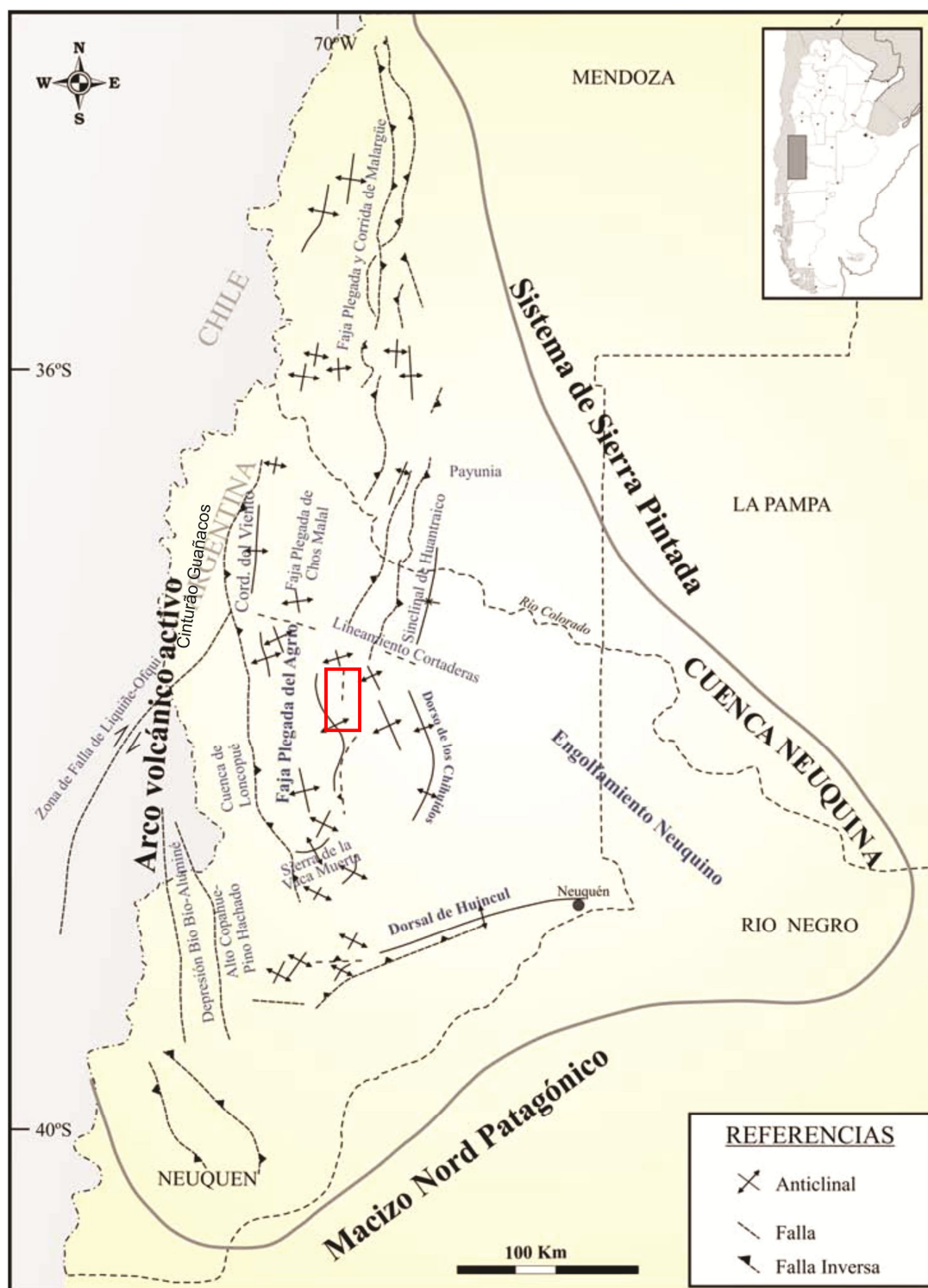


Figura 3 - Localização geográfica, limites e principais estruturas da Bacia Neuquén (modificado de Yagupsky, 2009). O retângulo vermelho delimita a área estudada.

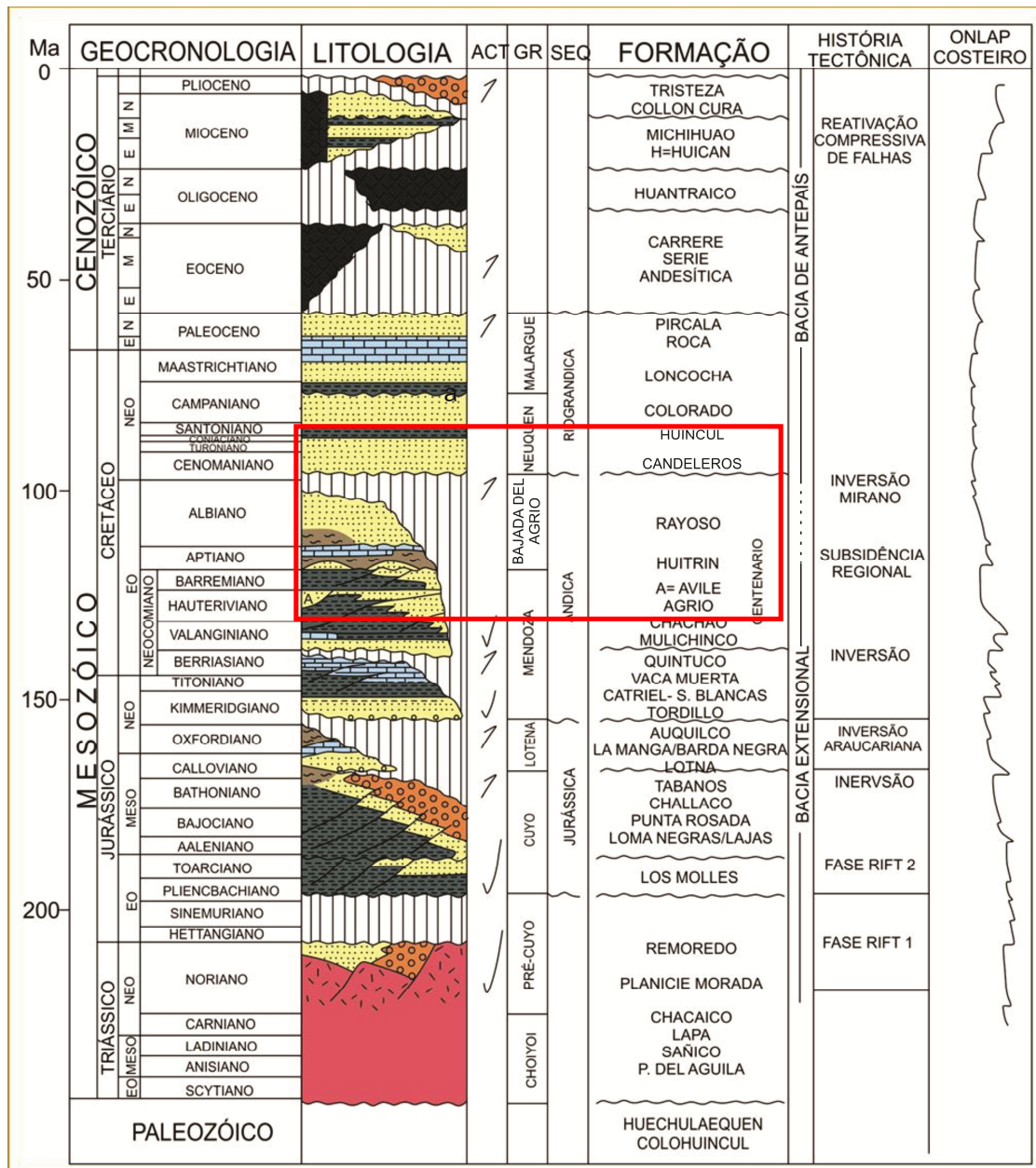


Figura 4. Carta estratigráfica da Bacia Neuquén, modificado de Veiga et al., 1995. O intervalo estudado está marcado em vermelho.

2.1 Compartimentação Geotectônica e principais estruturas

A Bacia Neuquén apresenta duas zonas distintas, uma com relevo pronunciado formado por cinturões de empurrões e dobramento, que é seu limite oeste. E, outra para E e SE representada por um engolfamento de relevo mais suave (Fig. 3). Em contraste com o domínio dos cinturões de dobramento, nesta região mais suave as rochas são pouco deformadas, de forma que a maior parte do registro Mesozóico se encontra em

sub-superfície. Além disso, a bacia é cortada por dois importantes lineamentos, o Arco ou Dorsal de Huicul e o Lineamento Cortaderas (Fig. 3).

2.1.1. Dorsal de Huicul

A Dorsal de Huicul é um sistema de hemigrábens Triássico-Jurássico com inversão multi-episódica (Vergani et al., 1995; Vergani, 2005, apud Yagupsky, 2009). Esta zona de falha tem orientação E-W até NE-SW, possui mais de 250 km de extensão e 60m de largura na porção centro sul da Bacia de Neuquén (Fig. 3). Esse lineamento corresponderia a uma zona de fraqueza do embasamento (Orchuela et al., 1981; Bettini, 1984; apud Yagupsky, 2009) interpretada como associada a colagem do terreno Patagônia ao Gondwana (Mosquera e Ramos 2005, 2006, apud Yagupsky, 2009). A falha principal deste sistema de hemi-grabens, Falha Divisadero na figura 5, era uma falha normal que foi reativada no final do Cretáceo como falha reversa destral mergulhando para NW. Associadas ao movimento reverso formaram-se duas pequenas sub-bacias onde foram depositadas diferentes facies da Formação Rayoso (Cobbold e Rosselo, 2003). Essa falha gerou um antiformal que é uma boa trapa estrutural apresentando vários campos de óleo ao longo da sua crista (Fig. 5).

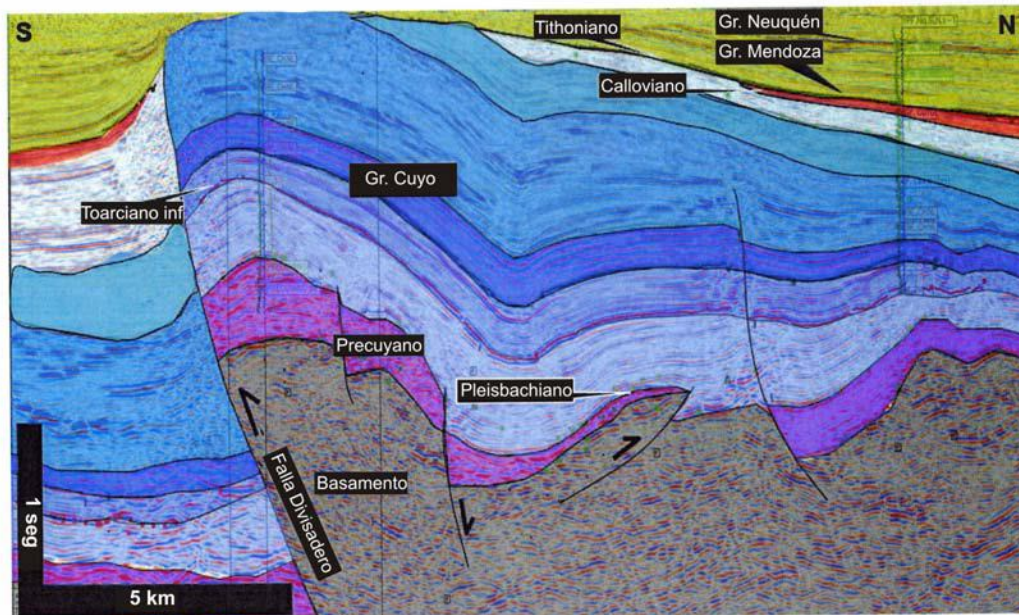


Figura 5. Seção sísmica através da dorsal de Huicul, segundo Pángaro et al. 2006b, in Yagupsky, 2009. A Formação Rayoso ocorre entre os grupos Mendoza e Neuquén (amarelo na figura).

2.1.2. Cinturões de dobramento

Na pré-cordilheira andina e em parte dos Andes austrais, os sedimentos da Bacia Neuquén foram dobrados e falhados formando um conjunto N-S de cinturões de dobras e empurrões, os cinturões Agrio, Chos Malal, Guañacos e Malargue. Esses cinturões são, em geral, caracterizados por falhas reversas e dobras com traços axiais de rumo em torno de N-S, produzidos por uma interação entre deformação *thick e thin-skinned*. A deformação *thick-skinned* é bem marcada nos cinturões Guañacos e Malargue (Fig. 6) onde a deformação foi associada ao alto gradiente térmico relacionado a magmatismo. O cinturão Agrio, onde foram realizados os trabalhos de campo, é descrito adiante.

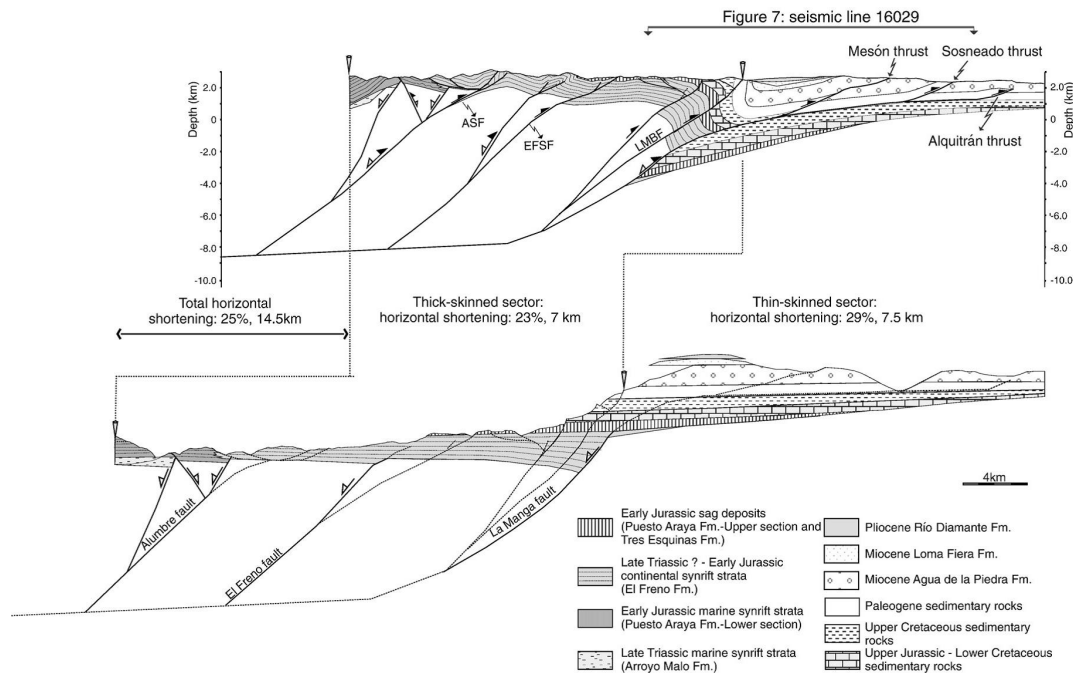


Figura 6. Restauração de seção no Cinturão Malargue segundo Giambiagi et al. (2008). Notar importante deformação *thick-skinned* durante a inversão da bacia e consequente formação do cinturão de dobras e falhas.

2.1.2.1 Cinturão Agrio

O Cinturão Agrio (Bracaccini, 1970; apud. Zapata 2002 et al.) é formado por unidades do Jurássico e Cretáceo. Se estende por 50km desde a latitude 37° 40' até 38° de latitude sul, sendo limitado ao norte pelo Lineamento Cortadeiras, a oeste pela Bacia de Loncopué, a leste pelo Alto de Los Chihuidos e termina a sul no final da Sierra de la Vaca Muerta (Figs. 3, 7).

As dobras e falhas reversas do cinturão possuem rumo norte ou noroeste. Os anticlinais tendem a ser apertados e normais, embora alguns sejam recumbentes. Já os sinclinais são extensos e suaves. Segundo Zapata et al. (2002) o cinturão é caracterizado por uma combinação de estruturas *thick-skinned* e *thin-skinned*. O encurtamento total foi calculado em cerca de 39km na porção norte e 19km na parte sul da faixa (Zapata et al., 1999a, b; apud Yagupsky, 2009). A diferença de encurtamento pode ser vista comparando as figuras 7c e 8. O setor externo é pouco deformado no sul do cinturão (Fig. 7c) em comparação com a parte norte (Fig. 8).

O Cinturão Agrio pode ser ainda dividido em dois setores (Ramos, 1978; Viñes, 1985; apud. Zapata et al. 2002; Fig. 7). O setor interior ou ocidental é composto por dobras de traço axial NW associadas à reativação reversa de um sistema extensional da bacia, chamado de sistema Tres Chorros (Vergani et al., 1995). Inclui também a porção sul do embasamento soerguido na Cordillera del Viento. Já no setor externo as dobras têm traço axial N-NW e a deformação *thin-skinned* é mais presente (Viñes, 1985; Ramos, 1998; Cristallini y Allmendinger, 1999; apud. Zapata et al. 2002). A deformação foi produzida por falhas de descolamento que aproveitam camadas de evaporitos jurássicos da Formação Auquilo até cretáceos da Formação Huitín (Fig. 4) conformando estruturas de tipo *fault-bend folding* (Zapata e Folguera, 2005). Além disso, as unidades superiores da Formação Agrio são localmente deformadas por dobramento flexural (Zapata et al., 2002). Na porção sudeste da zona externa do cinturão ocorre um importante sistema de falhas de traço aproximado norte-sul, o Sistema de Falhas Salado. Este sistema é associado a uma zona triangular onde ocorre dobramento e redobrimento das unidades (Zapata et al., 2002; Fig. 7c).

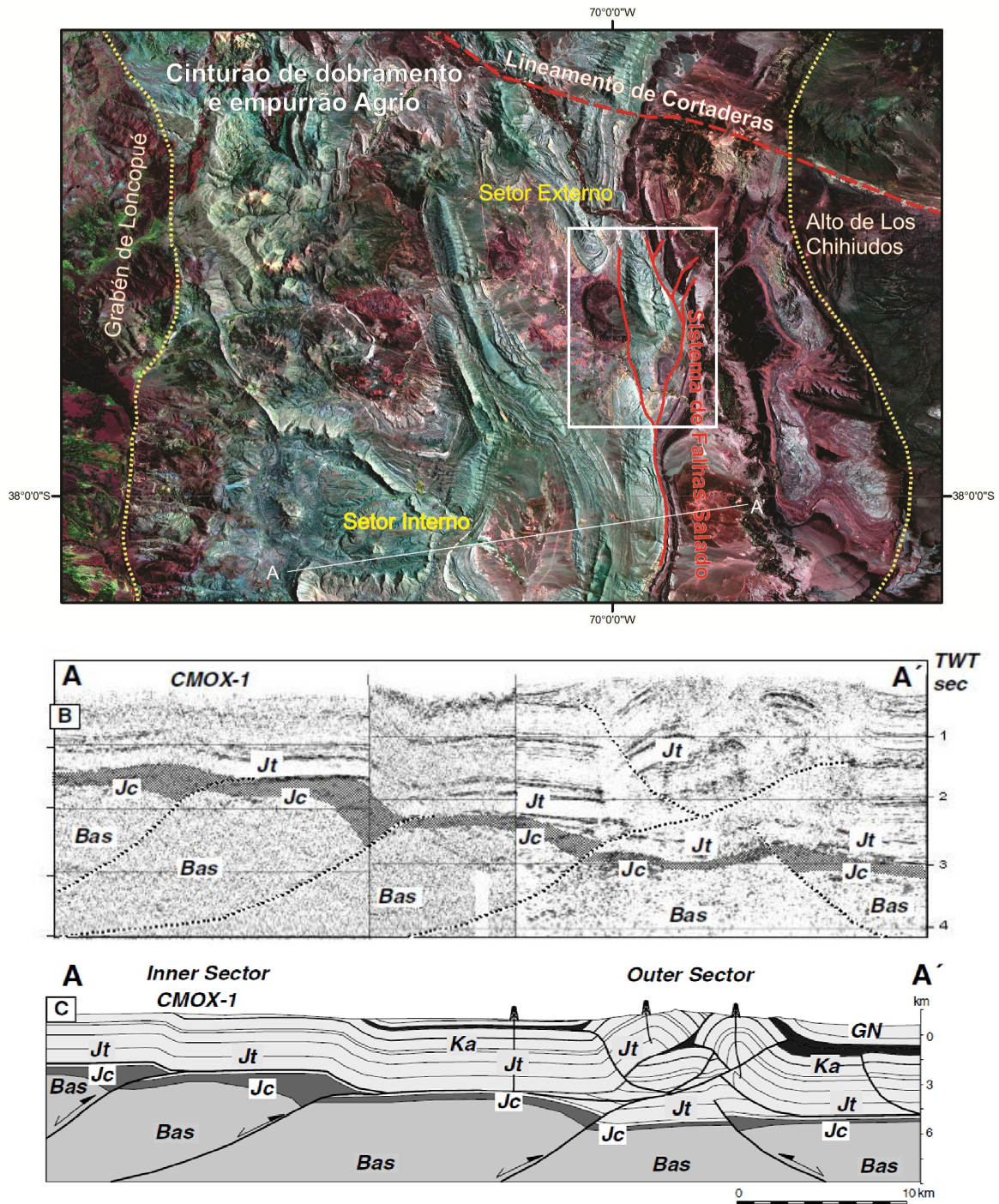


Figura 7. Imagem LANDSAT mostrando os setores interno e externo do Cinturão Agrio e localização da área de estudo (retângulo branco) baseado em Cobbold e Rossello (2003), Zapata e Folguera (2005). Diferenças no estilo estrutural dos setores interno (inner sector na figura) e externo (outer sector) do cinturão são mostradas nas seções sísmica (b) e balanceada (c) de Zapata e Folguera (2005). Bas- embasamento, Jc- Grupo Cuyo, Jt- Formação Tordilho, Ka- Formação Agrio e GN- Grupo Neuquén.

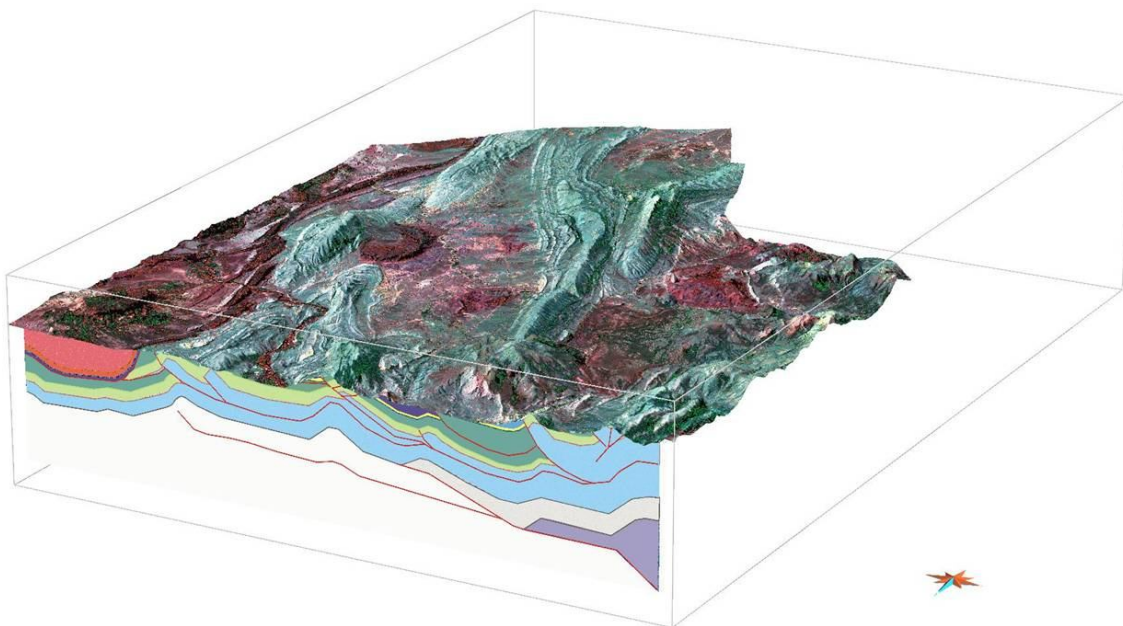


Figura 8. Modelo tridimensional mostrando seção balanceada na parte norte do Cinturão Agrio. Modelo feito no *software* GOCAD, interpretação com auxílio dos geólogos Mario Araújo e Paulo Santarém, CENPES, Petrobrás.

O Cinturão Agrio possui duas fases principais de deformação. A primeira no final do Cretáceo (Ramos, 1988; Hernández, 2001; apud Zapata et al., 2002) foi uma compressão aproximadamente E-W (Cobbold e Rossello, 2003). Esta fase gerou o cinturão, principalmente, com deformação *thin-skinned*. Ocorreu reativação de falhas normais em reversa (sic) e geração de falhas reversas, com dobras associadas. A vergência geral é para leste, exceto em porções do setor externo do cinturão onde ocorrem zonas triangulares (cf. *outer sector na figura 7*). A área estudada tem sido considerada parte do setor externo.

A segunda fase de deformação ocorreu no Mioceno e é interpretada como uma reacomodação das estruturas prévias (Hernández, 2001; apud Zapata et al., 2002). Segundo Zapata et al. (2002), nessa segunda fase ocorreu a inversão de falhas normais profundas, pré-jurássicas, que cortam também o embasamento da bacia. As estruturas *thin-skinned* geradas anteriormente foram deformadas por esta tectônica *thick-skinned* (Fig. 9). Cobbold e Rossello (2003) descrevem essa segunda fase de deformação como transpressiva associada a uma direção de *stress* principal nordeste. Inferem também um componente de transcorrência destrai paralelo ao orógeno.

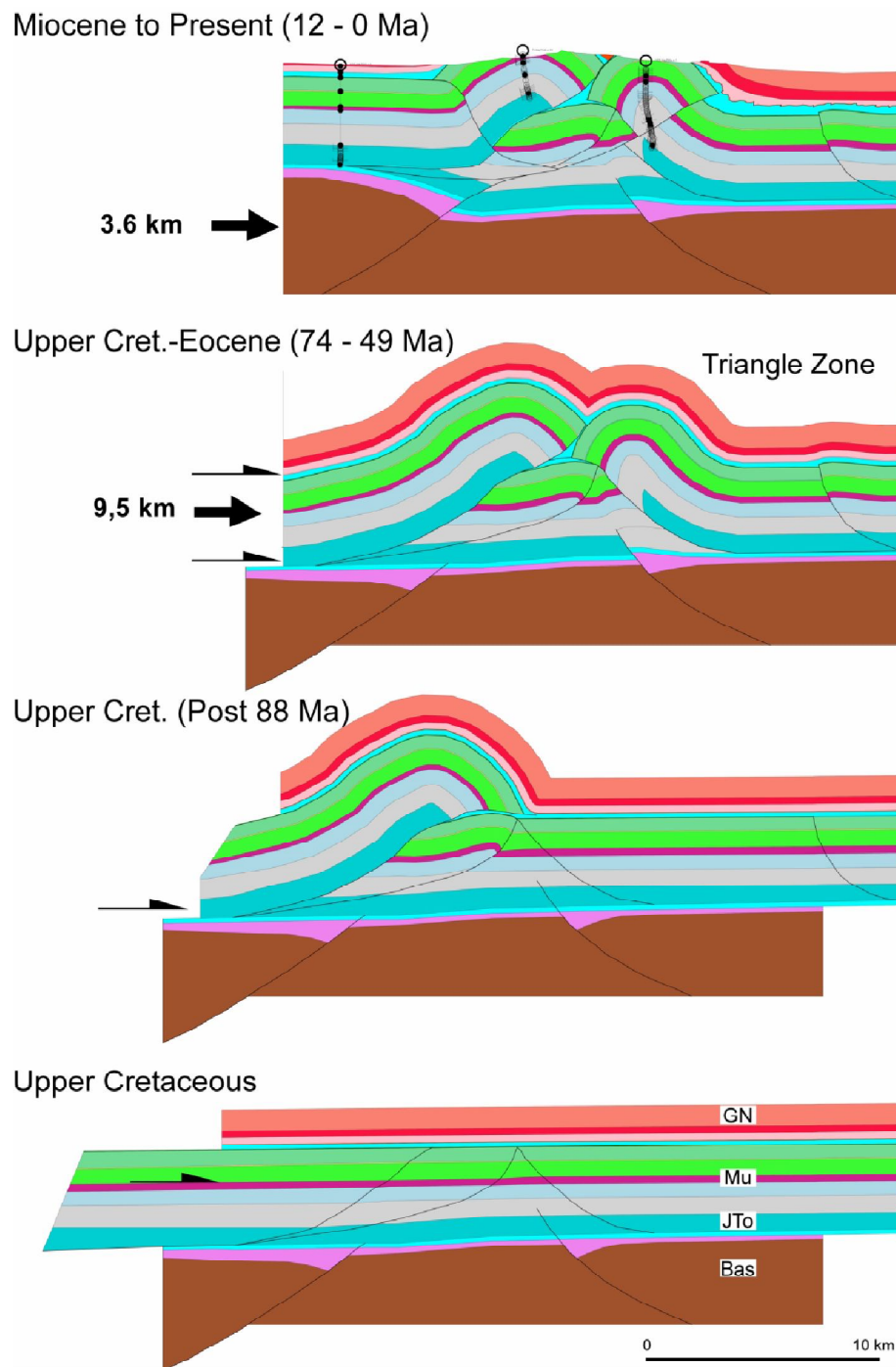


Figura 9. Restauração de zona triangular de parte setor externo do orógeno - *outer sector* na figura 7, segundo Zapata et al., 2002. Nesta seção pode ser observada tectônica *thick-skinned* registrada no Mioceno.

2.1.3. O Lineamento Cortaderas

Este lineamento pré-andino representa uma zona de fraqueza no embasamento associada a fraturamento no início do Mesozóico. Próximo a Chos Malal, logo a norte da área mapeada, a estrutura é uma falha reversa com vergência para nordeste. Nesta área o lineamento separa os cinturões Agrio a sul, e Chos Malal a norte do lineamento (Fig. 3). A noroeste de Chos Malal, perto de Cerro Tormenta a vergência é para norte-nordeste. Datações em estratos de crescimento sugerem movimentação durante o Eoceno (Ramos e Barbieri, 1989; apud Cobbold e Rossello, 2003).

O interessante é que o lineamento separa dois setores contrastantes de historia estrutural e magmática. Segundo Ramos e Folguera (2005), ao norte do lineamento a Cordilheira Andina é mais estreita que a sul e o magmatismo expressivo, com forte expansão do arco em direção ao ante-país durante o Cenozóico. A deformação associada ao gradiente térmico magmático favoreceu a tectônica *thick-skinned* no cinturão Malargue (Ramos e Folguera, 2005; Fig. 6).

Ao sul do Lineamento de Cortaderas a deformação importante aconteceu desde o final do Eo-Cretáceo até o término do Cretáceo. Neste intervalo foi gerada a bacia de ante-país onde se depositaram os sedimentos do Grupo Neuquén, a leste do Cinturão Agrio (Fig. 7a). Durante o Eoceno e Mioceno ao sul do lineamento ocorreu também reativação do Dorso de Los Chuidos e da Dorsal de Huincul.

Os setores a norte e sul do Lineamento de Cortaderas passaram por período extensional no Oligoceno, Plioceno e Pleistoceno. No Oligoceno foi formada a Bacia de Cura Malin, no Plioceno ocorreram expressivos derrames de basalto e durante o Pleistoceno se formaram os grabéns de Las Loicas a norte e de Loncopué a sul do lineamento (Ramos e Folguera, 2005).

No Quaternário um novo período compressivo gerou inversão da Bacia Cura Malin formando o Cinturão Guañacos (Fig. 3) e deformando basaltos de apenas 2 Ma. Essa atividade neotectônica contrasta com o Cinturão Agrio, fossilizado desde o Mioceno.

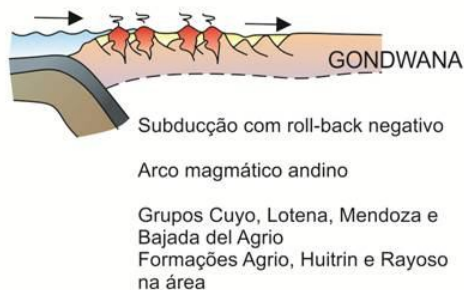
O modelo de Ramos e Folguera (2005) sintetiza a evolução geotectônica ao sul e ao norte do Lineamento de Cortaderas (Fig. 10).

AO SUL DE CORTADERAS

a) Triássico - Jurássico Inferior



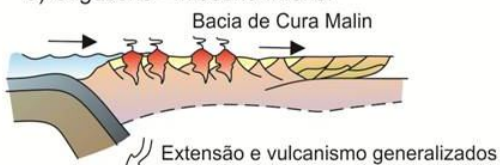
b) Jurássico - Cretáceo Inferior



c) Cretáceo Superior - Paleógeno



d) Oligoceno - Mioceno Inferior

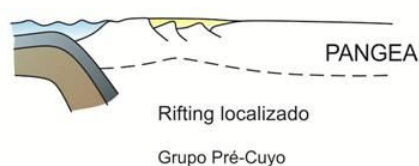


e) Mioceno Médio - Superior

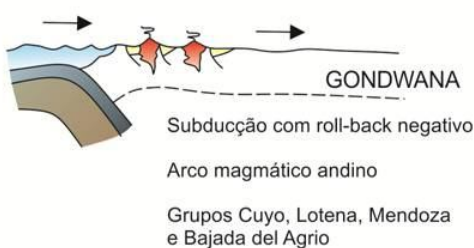


AO NORTE DE CORTADERAS

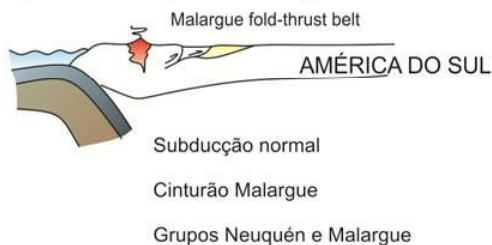
a) Triássico - Jurássico Inferior



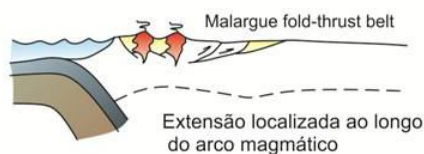
b) Jurássico - Cretáceo Inferior



c) Cretáceo Superior - Paleógeno



d) Oligoceno - Mioceno Inferior



e) Mioceno Médio - Superior



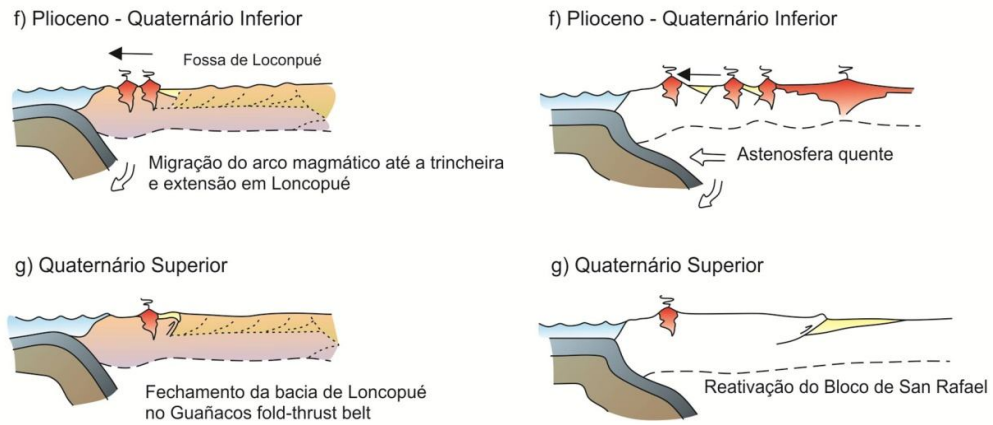


Figura 10. Evolução geotectônica da Bacia Neuquén nos setores ao sul e ao norte do Lineamento Cortaderas. A área estudada situa-se ao sul do Lineamento Cortaderas. Modificado de Ramos e Folguera, 2005.

3. Geoprocessamento

O geoprocessamento teve grande importância no presente estudo por otimizar o restrito trabalho de campo realizado na área por dificuldades logísticas. A etapa de geoprocessamento compreendeu a confecção de mapas, modelos 3D e o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo de atitudes a partir de *dip-slopes*.

3.1 Confecção e integração de mapas base, imagens e modelos.

Foram construídos modelos de relevo sombreado *hillshade* e mapas de curvas de nível a partir do modelo digital de elevação de interferometria de radar do SRTM, e um mosaico de imagens de satélite com alta resolução espacial *QuickBird*, datados de 15/01/2006 e 20/10/2006, que foram todos integrados no programa *ArcGIS 9.3*.

3.1.2 Mosaico de Imagens

O mosaico cobre cerca de 600 km² e foi confeccionado em dois meses de trabalho a partir da captura de trezentas telas em zoom de detalhe no programa *Google Earth*. Isso foi feito porque na área são exibidas imagens do satélite *Quickbird* que, por possuírem grande resolução espacial, são extremamente úteis para a fotogeologia. As cenas capturadas foram formatadas e unidas manualmente usando o programa *CorelDraw X5*. O conjunto foi georeferenciado no *ArcMap* usando o grid do *Google Earth*, com coordenadas geodésicas e *datum* WGS-84.

Como pode ser observado na Figura 11, duas faixas norte-sul dividem o mosaico de imagens em termos de intensidade de cor. Isso se deve aos fatos das imagens serem obtidas pelo satélite em datas distintas e a faixa oeste ser adquirida em um dia com muita névoa. O balanceamento das imagens para interpretação foi obtido por aumento de ganho da imagem oeste.

As duas faixas, segundo o georreferenciamento do *Google Earth*, apresentam problemas de sobreposição deslocando estradas e rios na zona de contato (Fig. 12). Durante o trabalho de campo foi notado que o erro era na faixa oeste e este foi corrigido, georeferenciando a imagem através do uso de trilhas e estradas mapeadas com o *tracklog* do GPS. Essa correção gerou deslocamento e rotação da faixa oeste, formando algumas lacunas na zona de contato entre as imagens (Fig. 11).

3.13 Produtos gerados através do SRTM

O SRTM é uma imagem de radar que contém dados de elevação atrelado ao pixel. Essa imagem possui pixel original com 30m de aresta, entretanto é distribuída com resolução inferior de 90x90m. Cerca 80% do globo terrestre é coberto por imagens SRTM, que são disponibilizadas gratuitamente. No presente trabalho foi usado o SRTMv4.1 adquirido no site <http://www.cgiar.org>.

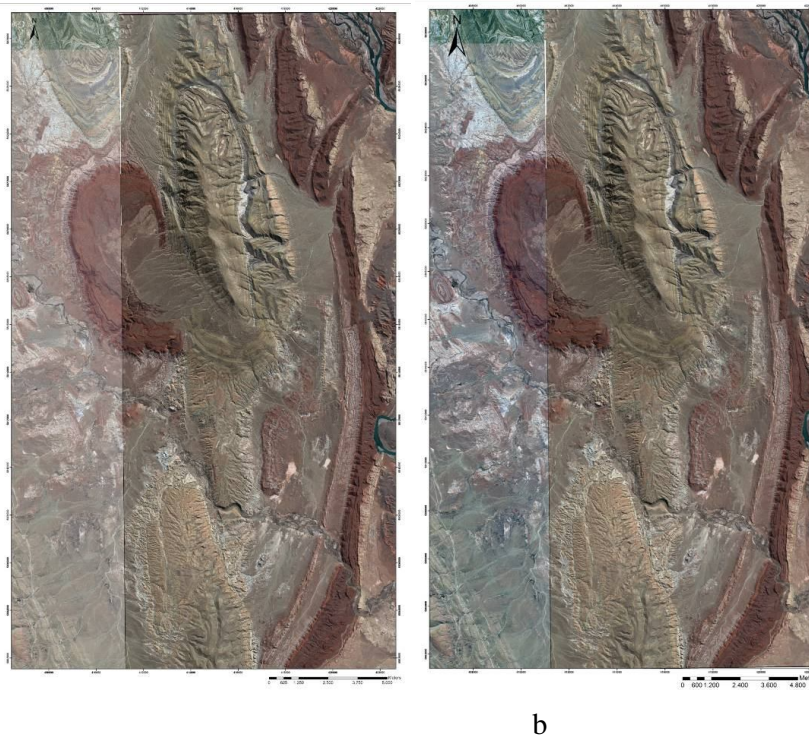


Figura 11. Mosaico de imagens *Quickbird* retiradas do *Google Earth* dividido em faixas. Nota-se o efeito da névoa provocando aspecto embaçado na faixa oeste em (a). Em (b) essa foi tratada ganhando mais nitidez, porém a diferença de tonalidade persiste.

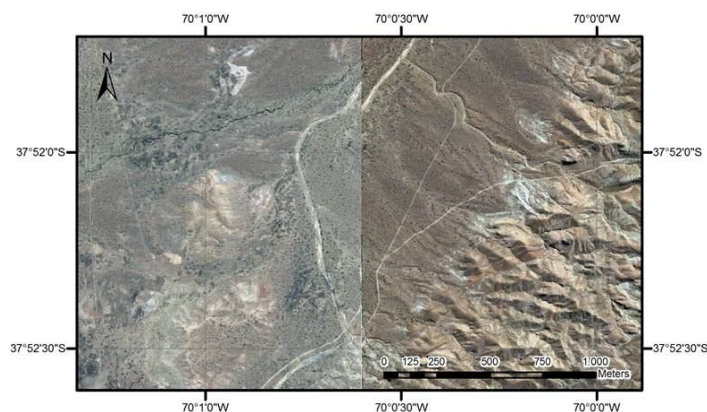


Figura 12 - Detalhe no mosaico de imagens mostrando erro de georreferenciamento nativo do *Google Earth*.

A partir do SRTM, cujo o pixel foi reamostrado para 30m por *Spline* Bi-cúbica pelo software FWTools, disponível gratuitamente em <<http://fwtools.maptools.org/>>, foram gerados no *ArcMap* mapas topográficos em vetor com intervalos de cota de 25 e 50 metros, respectivamente. O primeiro foi sobreposto à imagem de satélite em escala de detalhe utilizada nos trabalhos de campo, ao passo que o segundo foi usado como uma camada para a confecção do mapa geológico final (anexo 1). Foram também gerados modelos de sombreamento de relevo (*hillshade*) simulando o efeito do sol a 45° de altitude, posicionado em azimutes de 340° e 40° (Fig. 13a,b). Essas posições foram escolhidas para realçar melhor os lineamentos aproximados ENE-WSW e NNW-SSE, respectivamente, relacionados às principais estruturas da área. A fim de visualizar as duas direções ao mesmo tempo, os dois modelos foram sobrepostos com transparência em tons de vermelho e azul, que mesclados formam uma imagem acinzentada com sobreamento composto originado pelo sol em duas posições distintas (Fig. 14). Por cima desse modelo foi colocado o mosaico de imagem com transparência de 30%. O resultado gerou uma sensação de relevo ao olhar a imagem em planta dada pelas sombras (Fig. 15). No *ArcScene* foi gerado modelo 3d da imagem de satélite e do mapa geológico a partir dos valores de altitude do SRTM (Fig. 16).

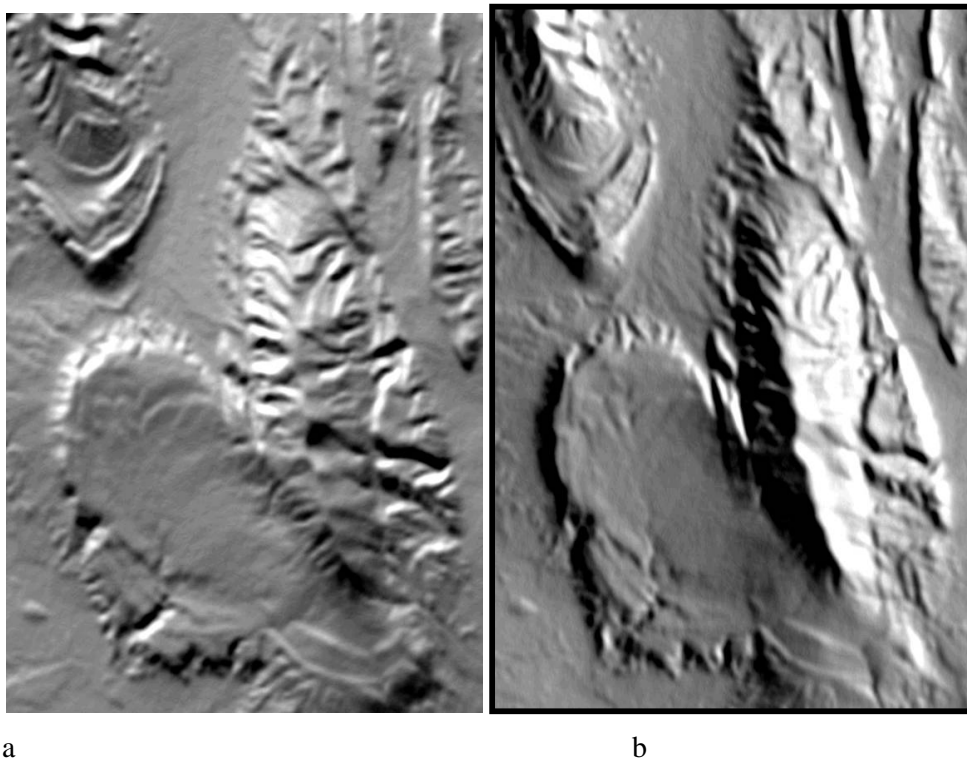


Figura 13. Modelos de sombreamento formados a partir de sol em azimuth de 40° (a) e de 340° (b), realçando diferentes feições.

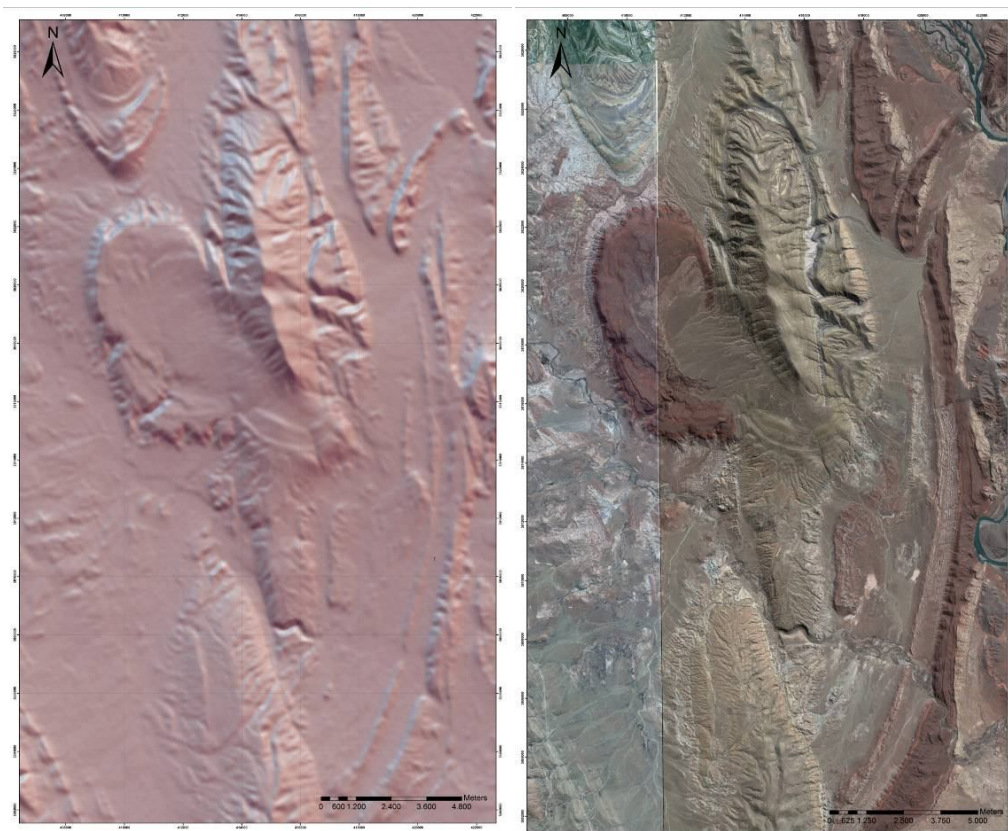
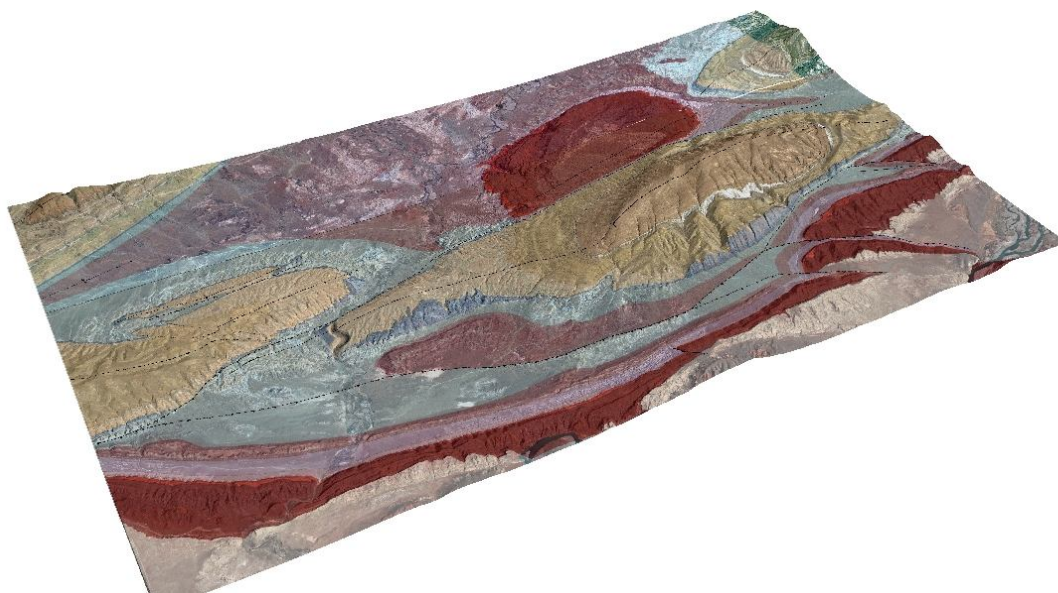


Figura 14. Modelo de sombreamento mostrando efeito do sol posicionado em azimutes de 40° e 340° simultaneamente realçando os dois conjuntos de lineamentos principais da área (a). Imagem sobreposta com transparência no modelo de sombreamento anterior, ganhando aspecto de profundidade (b).



Figuras 15. Modelo 3D construído usando os valores de elevação do SRTM, mostrando mapa geológico sobre imagem de satélite.

3.2 Cálculo de atitudes a partir de *Dip-Slopes*

Em regiões montanhosas de clima árido muitas vezes ocorrem vertentes inclinadas na geomorfologia, que acompanham o mergulho da foliação (Fig. 16) (Wilson & Gallant, 2000). No presente trabalho se desenvolveu parte de técnica para o cálculo de atitude de camadas com base na análise desse tipo de feição geomorfológica. Para poder realizar esse tipo de estudo são necessários um MDE (modelo digital de elevação) e uma imagem de satélite (ou foto aérea). A dimensão da vertente estudada precisa ser compatível com a resolução do modelo digital de elevação. Esse é um fator limitante relevante, pois são raras as áreas que possuem esse tipo de feição na escala do SRTM, que é distribuído gratuitamente e possui resolução de 90x90 metros. No caso particular da área desse estudo, o uso dessa metodologia é facilitada pois existem *dip-slopes* de grande extensão e foi usado um MDE com pixel de 30 metros de aresta.



Figura 16. Foto mostrando vertente da montanha que acompanha a atitude das camadas formando feição geomorfológica *dip-slope*. A camada morrom escura apresenta na foto cerca de 200m de comprimento do topo a base.

O primeiro passo foi a criação de polígonos delimitando topo de camadas expostas usando o mosaico de imagens produzido anteriormente (Fig. 17). A partir do

modelo digital de elevação foi gerado um mapa de declividade (Fig. 18), que foi recortado preservando somente as áreas dentro dos polígonos criados anteriormente. Nesse mapa, a cada pixel é atribuído um ângulo, o qual é calculado a partir da máxima mudança de elevação na distância entre o pixel referido e seus oito vizinhos (Wilson & Gallant, 2000). A figura 19 explica o método.



Figura 17. Polígonos delimitando algumas superfícies formadas por topo de camadas com grande área exposta.

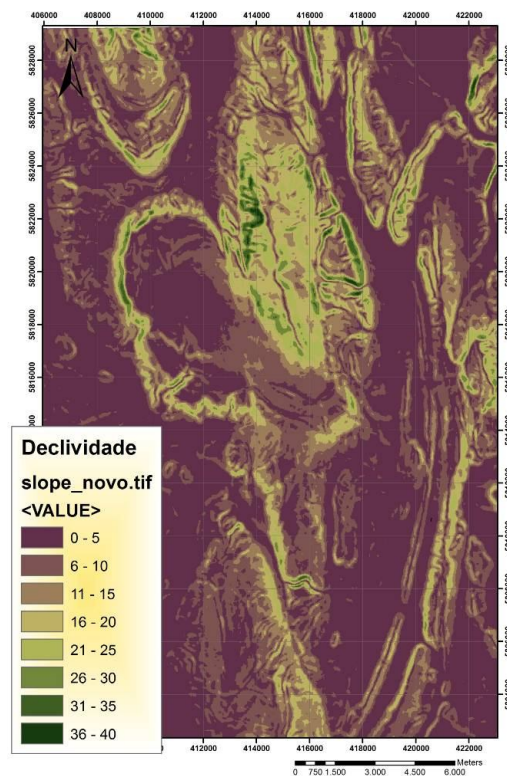


Figura 18. Mapa de declividade. Os valores da legenda se encontram em graus.

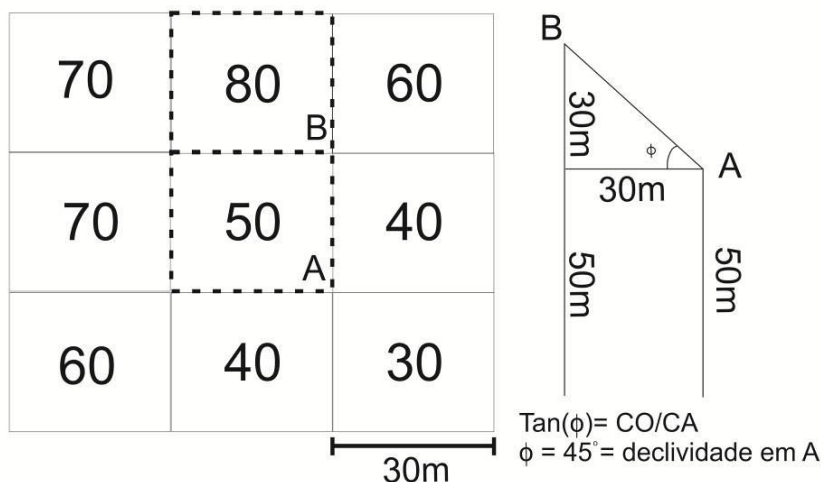


Figura 19. Esquema exemplificando a metodologia usada para a confecção de mapa de declividade a partir de um dado MDE. Na figura os quadrados representam os pixels do MDE e os números que se encontram por dentro, os valores de elevação. Nesse exemplo, é usado para o cálculo da declividade em A o valor de elevação do Pixel B por representar o maior desnível. Pela construção de um triângulo retângulo cujo os catetos são formados pelo desnível e aresta do pixel se obtém a declividade.

A área de uma superfície planar não horizontal seria representada em um mapa de declividade através de pixels de mesma cor, pois a declividade teria valor constante ao longo da região. Entretanto, como pode ser observado na Figura 20, existe variação de declividade ao longo dos topos de camadas delimitadas que são formadas por irregularidades nos planos. Os valores de declividade máxima mostram grande fidelidade com as os ângulos de mergulhos de acamamento medidos próximos (Fig. 20a). Foram também geradas retas de maior declive partindo do centróide de cada pixel dentro das áreas delimitadas (Fig. 20b). A consistência na orientação dessas retas observadas dentro desses polígonos é prova que esses delimitam uma superfície relativamente plana. Logo, a orientação média dessas retas representa a direção de mergulho dessa camada que é bem próxima as medidas em pontos próximos (Fig. 20b).

Não foi possível extrair de forma automática os azimutes dessas retas no *ArcGIS* 9.3, entretanto existem rotinas disponibilizadas gratuitamente na internet que fazem isso em versões mais antigas do *software*.

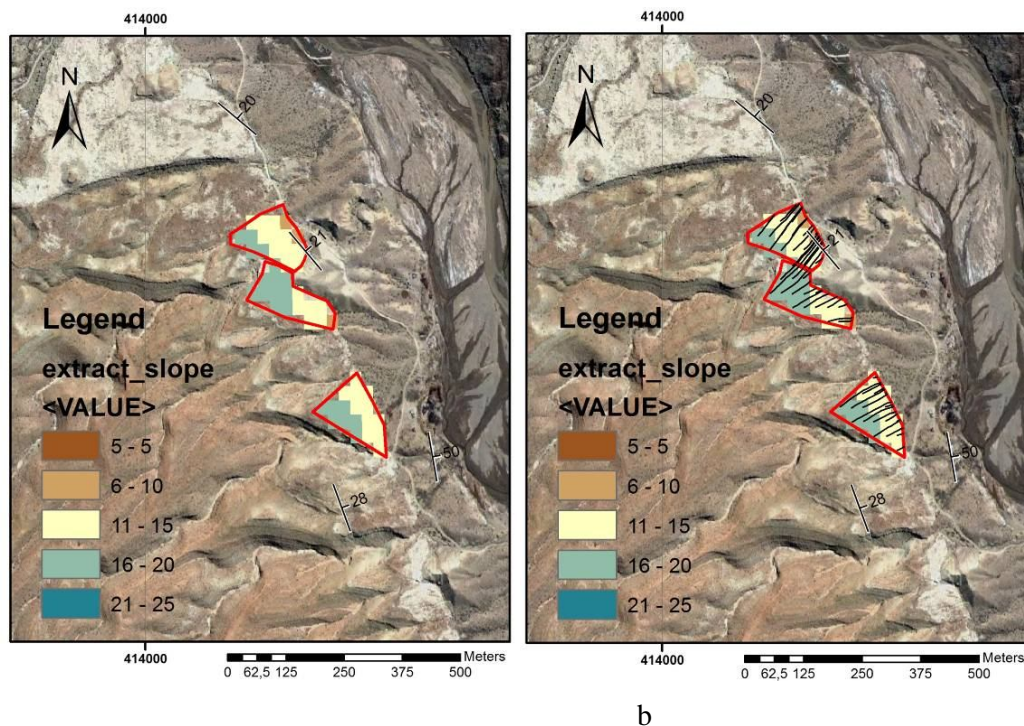


Figura 20. Imagem mostrando proximidade dos valores de declividade máxima nas superfícies com o valor medido no campo em (a) e orientações dos lineamentos de declividade máxima compatíveis com medida de campo (b).

Ainda não há plena certeza de que esse método para cálculo do acamamento a partir do *dip-slope* é completamente consistente. Pois, devido ao restrito trabalho de campo, não houve tempo de realizar medidas suficientes ao longo dos *dip-slopes* e testar a resposta em diferentes ângulos de mergulhos. Mesmo assim, os resultados preliminares são promissores apresentando grande fidelidade com a realidade. Realizar esse cálculo ainda é um processo trabalhoso que envolve muitos comandos no *ArcGIS*. A próxima etapa consistiria em escrever uma rotina para o *ArcGIS*, englobando todos os comandos realizados e uma rotina para extração de azimuth de lineamento. Dessa forma, tendo um MDE, seria apenas necessário desenhar os polígonos delimitando os *dip-slopes*. O restante do trabalho poderia ser feito automaticamente com um clique.

4. Estratigrafia

4.1. Introdução

Foram mapeadas na área doze unidades (Anexo 1) que abrangem o intervalo de tempo do Neocomiano na base do Eocretáceo até o Cenomaniano no Neocretáceo, conforme mostra a carta estratigráfica de Vergani et al. (1995; Fig. 4). Estas unidades fazem parte das formações Agrio do Grupo Mendoza, Huitrín e Rayoso do Grupo Bajada del Agrio e Candeleros e Huicul, do Grupo Neuquén (Fig. 21).

Idades	Leanza (2003)		Este Trabalho	
CENOM.	GRUPO NEUQUÉN	Fm. Huicul	GRUPO NEUQUÉN	Fm. Huicul
		Fm. Candeleros		Superior
98.9+0.6				Inferior
ALBIANO	GRUPO BAJADA DEL AGRIO	Mb. C. de la Zorra	GRUPO BAJADA DEL AGRIO	Superior
		Mb. Pichi Neuquén		Médio
		Mb. Quili Malal		Inferior
112.2+1.1				
APTIANO	GRUPO HUITRÍN	Mb. Rincón	GRUPO HUITRÍN	Mb. Salina
		Mb. Salina		Mb. La Tosca
		Mb. La Tosca		Mb. Troncoso Sup.
121.0+1.4				Mb. Troncoso Inf.
BARREMIANO	GRUPO AGRIO	Mb. Troncoso sup. inf.	GRUPO AGRIO	Mb. Agua d. L. Mula
		Mb. Chorreado		Mb. Avilé
		Mb. Agua d. L. Mula		Mb. Pilmatué
		Mb. Avilé		
127.0+1.6				
HAUT.				

Figura 21. Coluna estratigráfica local comparada com a coluna de Leanza (2003). Em cores as unidades de mapeamento neste trabalho – vide mapa geológico (anexo 1).

A Formação Agrio é interpretada como depósito plataforma *offshore* em bacia retro-arco (Fig. 22). As formações Huitrín e Rayoso representam fase de transição de tectônica extensional no retro-arco para compressional quando se instalou na região uma bacia de ante-país, representada pelos depósitos do Grupo Neuquén (Fig. 22). Esta migração de retro-arco extensional para ante-país foi devida a aumento na velocidade de subducção da placa proto-pacífica o que acarretou diminuição no ângulo de subducção. O processo aumentou o atrito entre as placas e os depósitos de retro-arco forma deformados se transformando na fonte para a recém instalada bacia de ante-país.

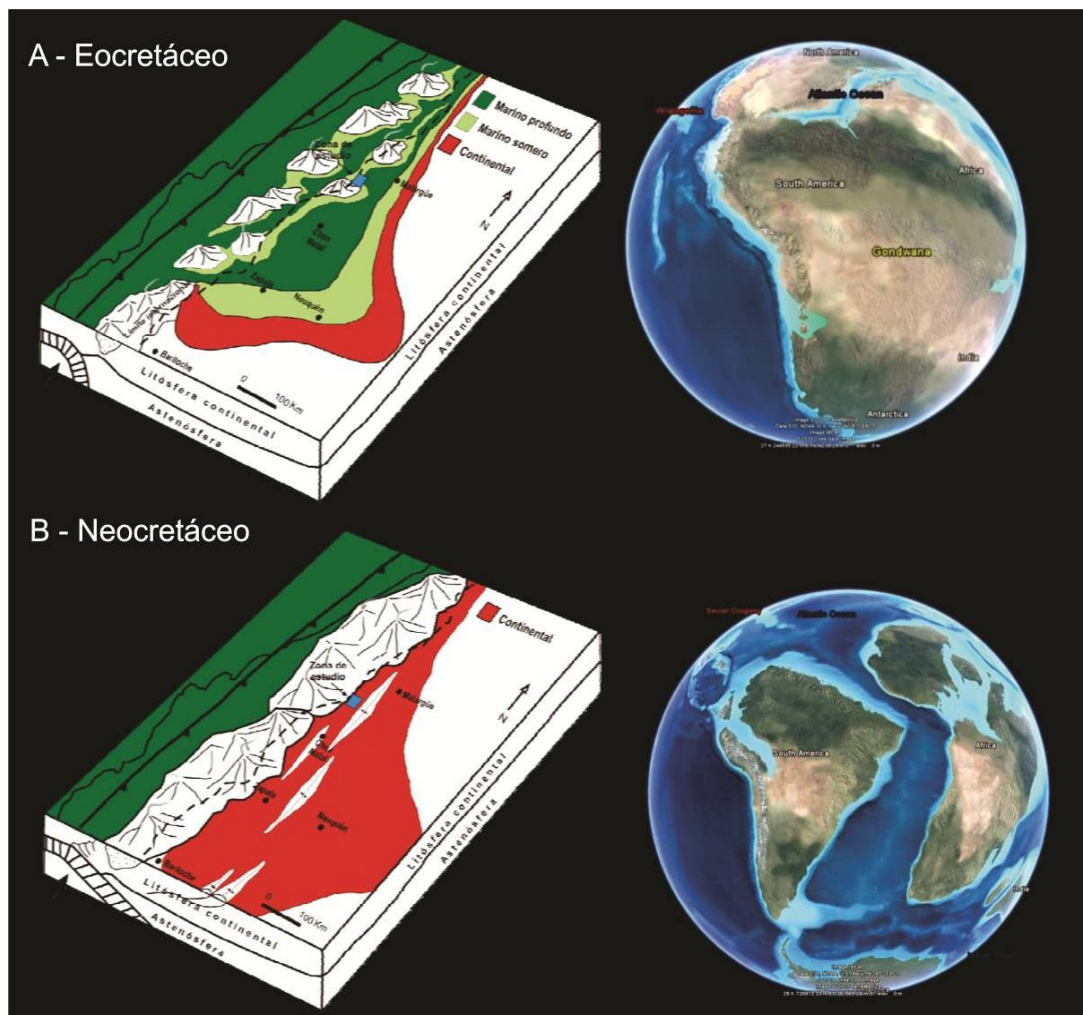


Figura 22. Modelo paleogeografico mostrando em A- deposição da Formação Agrio (verde escuro e claro) em bacia de retro-arco e B- Grupo Neuquén em bacia de ante-país. Blocos diagramas modificados de Howell et all (2005) e paleogeografia global por

Ron Blakey ([http://cpgeosystems.com /index.html](http://cpgeosystems.com/index.html)). Em A o modelo global retrata o Neojurássio, mas a configuração de retro-arco se manteve no Eocretáceo.

4.2. Estratigrafia local – Cerro Rayoso e adjacências

Conforme acima mencionado, foram mapeadas doze unidades do Cretáceo que correspondem a distintas formações dos grupos Mendoza, Bajada del Agrio e Neuquén (Fig. 21 e anexo 1).

4.2.1. Formação Agrio – Grupo Mendoza

Esta unidade aflora no núcleo dos anticlinais com maior exposição no Cerro Rayoso. A formação definida por Weaver (1931, apud Aguirre Urreta e Rawson, 1997) foi dividida por Aguirre Urreta e Rawson (1997) em três membros: Agrio Inferior, Avilé e Agrio Superior (Fig. 21). Por sua identidade litológica, continuidade e serem mapeáveis na escala 1:25:000 estes três membros poderiam ser formações (anexo 1). Uma quarta unidade, o Membro Chorreado, aparentemente ausente na área estudada, é constituído por carbonatos finos e evaporitos. Esse membro tem sido considerado por alguns autores como Leanza (2003) parte do topo da Formação Agrio (Fig. 21) e por outros como Veiga et al. (2003) base da Formação Huitrin.

4.2.1.1. Membro inferior, Pilmatué

Sem base exposta na área mapeada, sua espessura mínima aflorante é de 400m. Este membro foi denominado de Pilmatué por Leanza e Hugo (2001, apud Leanza et al., 2002) que estimam a espessura em 718m na área de Pilmatué, cerca de 50 km a sul do Cerro Rayoso. Os autores identificaram pelito siliciclástico esverdeado, pelito carbonático cinza e intercalações bioclásticas incluindo fósseis marinhos do Cretáceo. No Cerro Rayoso, identificamos argilito maciço e folhelho argiloso, ambos de cor cinza escura, e intercalações de coquina e arenito em bancos com espessuras variadas, até decimétricas (Fig. 23, 24). Os pelitos registram deposição abaixo do nível base de ondas em ambiente de costa a fora. Os bancos de arenito e coquina podem representar areia litorânea transportada costa a fora (*offshore*) durante tempestades. Esta interpretação é coerente com as de Aguirre Urreta e Rawson (1997), Leanza e Hugo (2001) e de outros trabalhos mais antigos como o de Uliana et al., 1975.



Figura 23. Argilito cinza e bancos de arenito do Membro Pilmatué, unidade da base da Formação Agrio no Cerro Rayoso.



Figura 24. Argilito e arenito do Membro Pilmatué, unidade basal da Formação Agrio, sobrepostos por arenito do Membro Avilé no Cerro Rayoso.

4.2.1.2. Membro intermediário – Avilé

No Cerro Rayoso este membro alcança 20 metros de espessura, sendo constituído por arenito claro, bem selecionado, localmente com seixos finos e intraclastos pelíticos. Os arenitos formam camadas lenticulares com espessuras decimétricas até cerca 1.5 metro, maciças ou com estratificação cruzada acanalada (Fig. 25) que registram a migração de dunas, provavelmente, fluviais ou litorâneas (*shoreface*). O Membro Avilé constitui um banco arenítico entre pelitos marinhos de costa a fora (membros inferior Pilmatué e superior Agua de La Mula) indicando drástica mudança no paleoambiente. Segundo Rossi e Masarik (2002) este membro inclui fácies fluviais, eólicas, lacustre marginal e *playa lake* em ambiente de leque aluvial terminal. A intercalação de sedimentos continentais entre pelitos *offshore* foi interpretada como breve episódio continental produzido por regressão forçada, provavelmente, relacionado a tectônica. Rossi e Masarik (2002) descrevem a composição lítica a feldspatolítica dos arenitos definida por fragmentos vulcânicos e sedimentares, o que corrobora a interpretação tectônica para a regressão forçada.



Figura 25. Corte lateral em estratificação cruzada acanalada de possível origem fluvial em arenito do Membro Avilé, Formação Agrio no Cerro Rayoso.

4.2.1.3. Membro superior - Agua de La Mula

Com 380 metros de espessura medidos na seção do Cerro Rayoso (anexo 1) esta unidade aparece em contato brusco sobre os arenitos Avilé (Fig. 26). É constituída por argilito e folhelho cinza escuro, nos quais se intercalam bancos delgados (1-10cm) de siltito carbonático e delgados até espessos (30-100cm) de arenito e coquina (Fig. 27). Os arenitos observados são médios a grossos, maciços ou com estratificação cruzada acanalada. Contém fósseis, localmente abundantes. As coquinas são aparentemente maciças ou gradadas (Fig. 28) e incluem amonitas fragmentados e inteiros (Fig. 29). Em direção ao topo da unidade os bancos de arenito se tornam mais frequentes e espessos e desaparecem as coquinas. No topo os arenitos chegam a mais de 50% da sucessão formando uma unidade com típica assinatura na imagem de satélite e bem distinta no campo (Figs. 30, 31). Esta unidade tem cerca de 60 metros de espessura, foi mapeada e seria um quarto membro no topo da Formação Agrio.

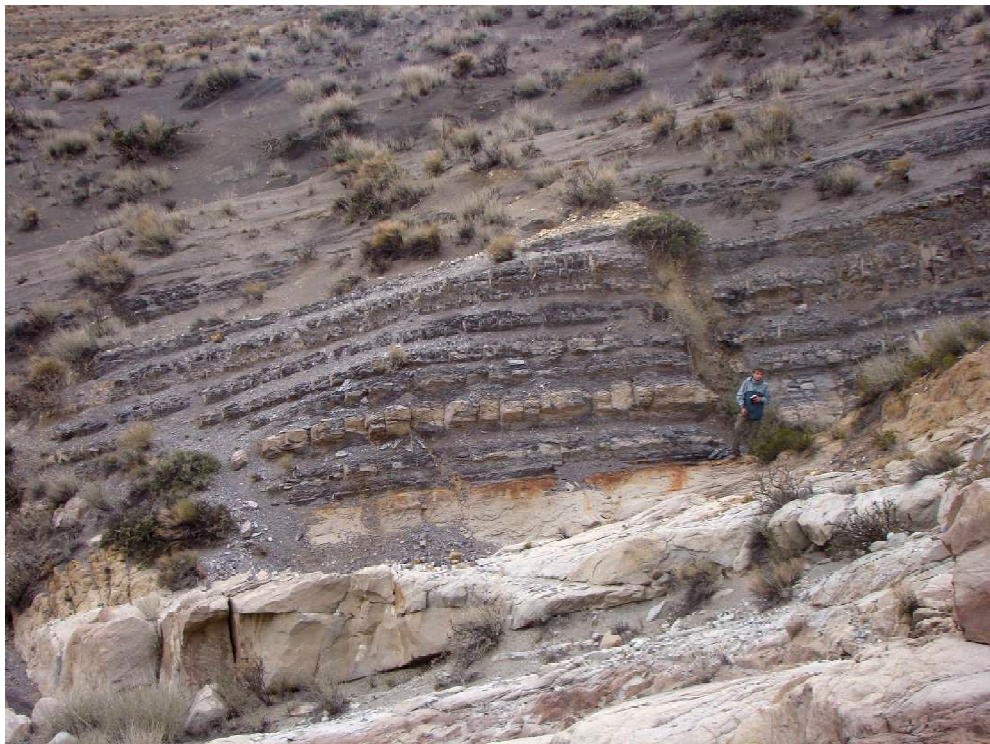


Figura 26. Argilito e bancos de arenito do Membro Agua de La Mula em contato brusco sobre arenitos Avilé. Flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso.



Figura 27. Bancos de arenito (a) e de arenito e coquina (b) intercalados em argilito cinza. Membro Agua de La Mula, Formação Agrio no flanco leste do Cerro Rayoso.



Figura 28. Camadas de coquina que ocorrem no Membro Agua de La Mula, unidade superior, Formação Agrio no flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso. Escala 6cm.



Figura 29. Amonita em banco de coquina no Membro Agua de La Mula, Formação Agrio no flanco leste do anticlinal do Cerro Rayoso. Escala 6cm.



Figura 30. Bancos de arenitos e intercalações de pelito topo do Membro Agua de La Mula. Acima, arenitos da Formação Huitrin. Canion no Arroyo Pichi Neuquén.



Figura 31. Predomínio arenito no topo do Membro Agua de La Mula formando unidade distinta, um quarto na Formação Agrio. Canion no Arroyo Pichi Neuquén.

Assim como no membro inferior Pilmatué, o espesso pacote de rochas pelíticas registra deposição abaixo do nível base de ondas em zona de costa a fora de ambiente marinho aberto. As intercalações de coquina e arenito podem ser interpretadas como tempestitos. No topo da unidade os ciclos arenito-pelito, com predomínio de arenito, podem representar a transição entre as zonas de costa a fora (*offshore*) e face de praia (*shoreface*). Interpretação semelhante foi apresentada por Veiga et al., 2005.

4.2.2. Formação Huitrín - Grupo Bajada del Agrio

Segundo Veiga et al. (2005), Groeber em 1946 dividiu esta formação em três membros: Troncoso Inferior arenítico, Troncoso Superior com evaporitos, carbonatos e pelitos siliciclásticos, e La Tosca com carbonatos, pelitos e evaporitos (Fig 32). Leanza (2003) inclui ainda, no topo da formação, o Membro Salinas com argilito e evaporito e considera que o Membro Chorreado, definido por Legarreta e Boll em 1982 e tradicionalmente incluído na base da Formação Huitrin, faz parte do topo da Formação Agrio. Conforme acima explicado este membro não foi reconhecido na área estudada.

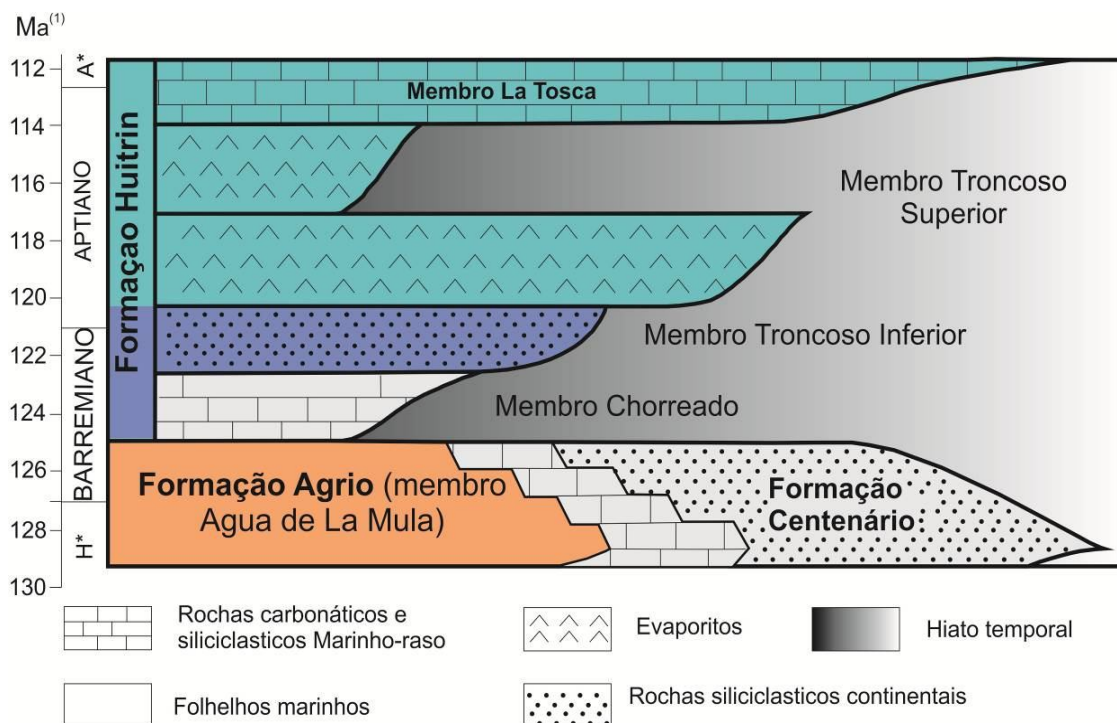


Figura 32. Carta cronoestratigráfica da Formação Huitrin segundo Veiga et al., 2003. O Membro Troncoso Inferior corresponde a Unidade Inferior e os membros Troncoso Superior e La Tosca a unidade superior no presente trabalho.

A Formação Huitrin alcança até 230 metros na área estudada. No presente trabalho foram reconhecidas e mapeadas duas unidades nesta formação: inferior, com arenitos que correspondem ao Membro Troncoso Inferior, superior com evaporitos, rochas carbonáticas e siliciclásticas pelíticas, que englobaria os membros Troncoso Superior, La Tosca e Salinas.

4.2.2.1. Unidade inferior – Membro Troncoso Inferior

A unidade inferior da Formação Huitrin é um corpo de arenito com cerca de 30 metros de espessura que aparece em discordância ora sobre arenitos, ora sobre pelitos do membro superior – Agua de La Mula da Formação Agrio (Fig. 33).

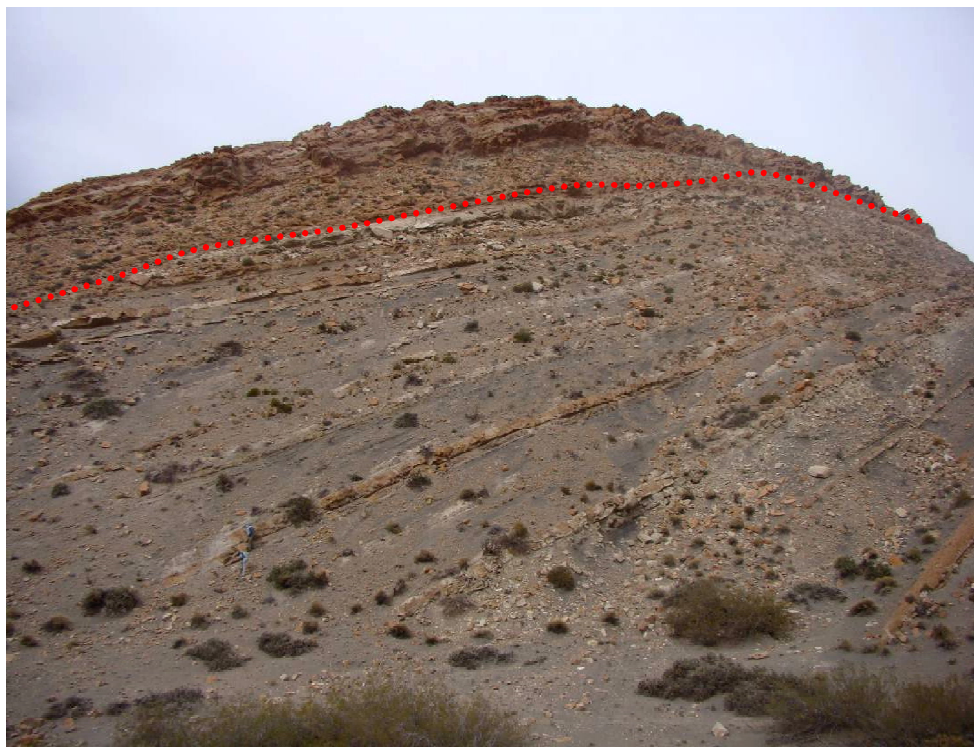


Figura 33. Arenitos basais da Formação Huitrín - Membro Troncoso Inferior em discordância erosiva sobre pelitos e arenitos da Formação Agrio. Flanco leste do Cerro Rayoso.

Os arenitos são finos a grossos, moderadamente selecionados e localmente com seixos finos espalhados e níveis delgados de granulo arenitos e conglomerados finos. Aparecem também localmente intraclastos pelíticos. Estes arenitos formam camadas espessas (30-100cm) e muito espessas (>100cm) com estratificação cruzada acanalada (Fig. 34) ou , aparentemente, maciças e camadas delgadas (1-10cm) com laminação plana ou marcas de onda assimétricas. As camadas espessas/muito espessas aparecem empilhadas em estratos métricos ou gradam para delgadas formando ciclos estrato-decrescentes para o topo. No topo da unidade aparecem camadas de arenitos médios e finos bem selecionados com estratificação cruzada de grande porte e alto ângulo (Fig. 35). Estes arenitos basais da Formação Huitrín foram interpretados por Leanza (2003) como fluviais na base e eólicos no topo. Seriam o registro de rios entrelaçados que passam para o topo a dunas de planícies eólicas.



Figura 34. Camadas de arenito com estratificação cruzada acanalada na base da Formação Huitrín. Flanco leste do Cerro Rayoso.



Figura 35. Estratificação cruzada de grande porte, de possível origem eólica, em arenitos no topo do Membro Troncoso Inferior, Formação Huitrín no Cerro Rayoso.

4.2.2.2. Unidade superior – membros Troncoso Superior, La Tosca e Salinas

Trata-se de um pacote com até 200 metros de espessura, constituído por uma sucessão de pelito e evaporito com intercalações de bancos de siltitos carbonáticos e arenitos finos siliciclásticos. Em contraste com as outras unidades que formam serras com boa exposição das rochas, nesta o relevo é arrasado e as rochas alteradas, parcialmente encobertas por detritos atuais (Fig. 36). Raramente se destacam na topografia (Fig. 37)

Os pelitos são argilitos e menor proporção de silito esverdeados ou cinzentos, maciços ou laminados quase sempre alterados com cores variadas, vermelhas, rosadas, amareladas, brancas (Fig. 38). Os evaporitos constituem laminas até camadas com espessura métrica, aparentemente, maciças e compostas essencialmente por gypsita e anidrita. Localmente foram identificadas brechas evaporíticas.



Figura 36. Paisagem típica dos pelitos e evaporitos da unidade superior da Formação Huitrín: afloramentos brancos e rosados formando relevo arrasado. As rochas são alteradas e parcialmente encobertas por detritos modernos. Ao fundo na foto afloram unidades da Formação Rayoso e do Grupo Neuquén em tom vermelho.



Figura 37. Pelitos rosados e acinzentos e bancos de evaporitos, topo da Formação Huitrín na parte sul da área.



Figura 38. Pelitos e bancos de evaporitos no topo da Formação Huitrín. Ao fundo a serra sustentada por arenitos da base da Formação Rayoso.

Os siltitos carbonáticos aparecem em camadas delgadas maciças com separações de argilito. As camadas se empilham formando estratos até decimétricos (Fig. 39) intercalados na sucessão pelito-evaporito. No flanco leste do Cerro Rayoso ocorre um estrato com espessura de poucos metros entre os arenitos inferiores e a sucessão pelito-evaporito. Possivelmente representa o Membro La Tosca, uma unidade carbonática acima dos arenitos inferiores conforme a definição de Groeber (1946; in Leanza, 2003). Arenitos siliciclásticos em camadas delgadas laminadas ou com marcas de onda constituem uma rara fácies intercalada na sucessão pelito-evaporito.



Figura 39. Siltitos carbonáticos em camadas delgadas maciças com separações de argilito. Formação Huitrín na área do Cerro Rayoso.

Segundo Uliana et al. (1975) a associação pelito-evaporito e carbonatos representa deposição em água rasa com períodos de exposição subaérea em lagunas rasas. Ambientes semelhantes seriam sabkas ou extensas planícies de maré com alternância de aporte de águas continentais e marinhas. Já Popnce et al. (2002) interpretam a sucessão como depósitos lacustres com salinidade introduzida pelo lençol freático dando origem aos evaporitos.

4.2.3. Formação Rayoso - Grupo Bajada del Agrio

Esta unidade aflora nas baixadas entre as serras formadas pelas rochas da Formação Agrio e do Grupo Neuquén. As melhores exposições aparecem a leste do Cerro Rayoso. Segundo Leanza (2003) a Formação Rayoso foi definida por Weaver em 1931 para incluir uma série de arenitos, argilitos e evaporitos de tonalidade rosada que afloram nas áreas do Cerro Rayoso e do Rio Pichi Neuquén. Leanza (2003) subdividiu a formação em quatro membros, da base para o topo: Rincon, Quili Malal, Pichi Neuquén e Cañadón de la Zorra (Fig. 21). O Membro Rincon inclui arenitos e siltitos rosados, o Membro Quili Malal é uma sucessão de argilitos de cores variadas com intercalações de evaporitos. O Membro Pichi Neuquén constitui-se arenitos e siltitos avermelhados que formam cristas na paisagem e o Membro Cañadón de la Zorra é uma associação com argilitos, margas, evaporitos e lentes de arenitos. Neste trabalho consideramos três unidades de mapeamento, inferior que corresponde ao Membro Rincon, média que inclui o Membro Quili Malal e superior, possivelmente, reunindo os membros Pichi Neuquén e Cañadón de la Zorra (Fig 21). Leanza (2003) mostra também a divisão da Formação Rayoso feita por Ramos (1981) na área do Cerro Rayoso. Esta divisão em três unidades, inferior, média e superior, é semelhante a adotada aqui.

4.2.3.1. Unidade Rayoso Inferior

Esta unidade basal da Formação Rayoso aparece em aparente conformidade sobre camadas de pelito e evaporito do topo da Formação Huitrín. É constituída por uma sucessão de arenitos com marcas de onda e com estratificação cruzada, com cerca de 200 metros de espessura medidos na seção geológica e 60 metros de espessura mínima nas margens do Rio Pichi Neuquén. Um perfil nesta localidade mostra estratos compostos formados pelo empilhamento de camadas delgadas (1-10cm) com marcas de onda e camadas médias (10-30cm) até espessas (30-100cm) com estratificação cruzada. Estes estratos formam ciclos grano e estratos crescentes para o topo (Fig. 40) que podem ser interpretados como ciclos transgressivos. Na facies rica em marcas de onda ocorrem marcas de corrente e de ondas (marcas simétricas) com crista reta ou sinuosa e padrões de interferência (Fig. 41). Nesta facies se intercalam esporadicamente camadas planas com lineação de partição (Fig. 42) e raros bancos tabulares delgados de carbonato maciço (siltito ?). Variados tipos de bioturbação estão presentes (Fig. 43) Na facies de maior energia predomina estratificação cruzada acanalada sobre planar (Fig. 44). As marcas de onda e estruturas cruzadas registram transporte tracional de areia em

regime de fluxo inferior baixo (marcas de onda) e alto (estratificação cruzada). As camadas com laminação plana e lineação de partição devem representar períodos de alta energia com transporte de grãos em regime de fluxo superior ($> 15\text{cm/seg}$ em areia média). O conjunto de estruturas e ciclicidade devem registrar processo transgressivo em um litoral onde ocorria transporte tracional (arraste, rolamento) de areia. A unidade parece corresponder ao intervalo 1 de Ponce et al. (2002), intervalo este interpretado pelos autores como depósito lacustre litorâneo.

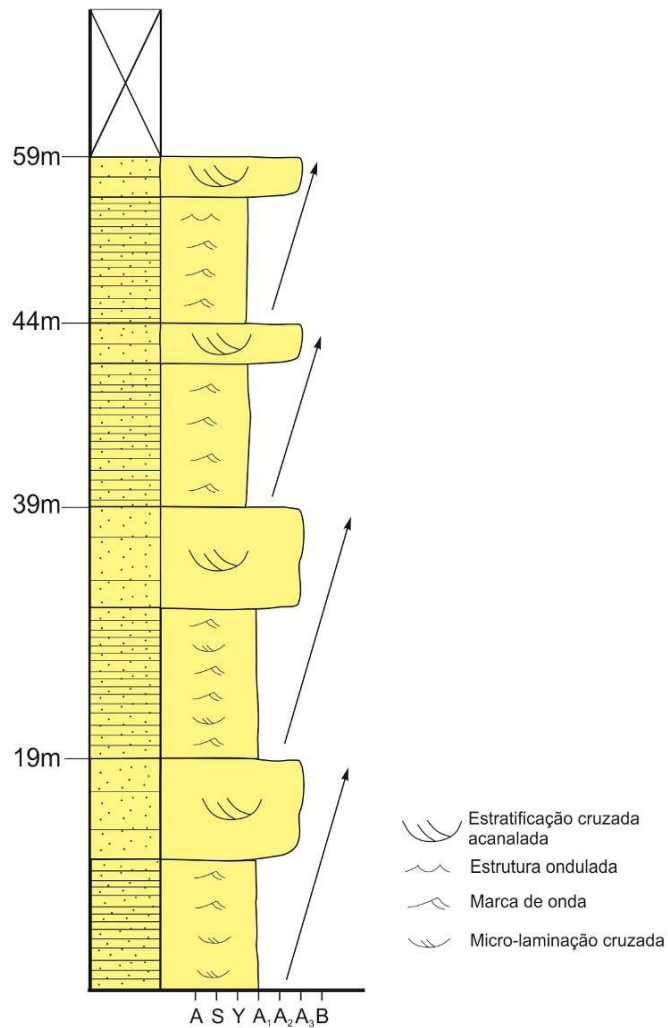


Figura 40. Ciclos grão e estrato crescentes formados por estratos compostos por dois tipos de fácies: arenitos com marcas de onda e arenitos com estratificação cruzada. Simplificado de perfil detalhado na base da Formação Rayoso no Rio Pichi Neuquén.



Figura 41. Padrão de interferência em marcas de crista sinuosa. Arenito da unidade basal da Formação Rayoso no Rio Pichi Neuquén.

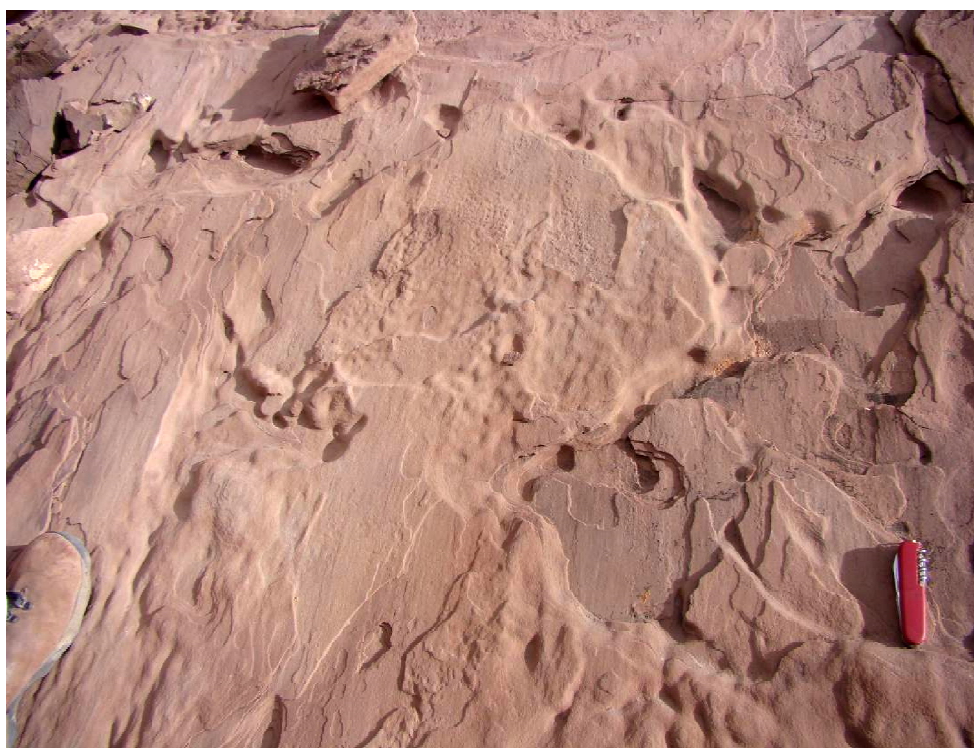


Figura 42. Lineação de partição em arenitos na base da Formação Rayoso no Rio Pichi Neuquén.



Figura 43. Bioturbação em arenito basal da Formação Rayoso em um serrote a norte do Rio Pichi Neuquén.



a



b

Figura 44. Estratificação cruzada em arenitos basais da Formação Rayoso próximo em serrote a norte do Rio Pichi Neuquén (a) e na área do Cero Rayoso (b).

4.2.3.2. Unidade Rayoso Média

Na área estudada esta unidade está parcialmente coberta por depósitos aluviais e fluviais quaternários, recentes e atuais (Fig. 45). A unidade aparece em conformidade sobre a unidade inferior e tem cerca de 200 metros de espessura medidos na seção do Cerro Rayoso (anexo 1). É constituída por siltitos esverdeados e rosados com intercalações delgadas de argilito cinzento, de bancos de gypsita evaporito localmente com até 1 metro de espessura, e bancos delgados de carbonatos finos. Estas facies sugerem depósitos em ambientes de baixa energia e águas rasas com períodos de maior salinidade dando origem a evaporitos. Ponce et al. (2002) interpretam esta facies como depósito de lagos salinos raso.



Figura 45. Paisagem típica da unidade Rayoso médio – pelitos alterados e parcialmente cobertos por depósitos modernos.

4.2.3.3. Unidade Rayoso Superior

Esta unidade constitui serrotes que se destacam na topografia (Fig. 46). Alcança cerca de 200 metros de espessura na área do Cerro Rayoso e aparece em conformidade sobre a unidade média. É constituída na base por pelitos e intercalações de arenitos, na parte média por proporções semelhantes de arenitos e pelitos e no topo por bancos espessos de arenito. Os arenitos são finos e médios em camadas delgadas até espessas, maciças, com laminação plana (?) ou estratificação cruzada acanalada de pequeno porte. No topo da unidade as camadas formam bancos individuais de até cerca de 2 metros de espessura. Os pelitos são argilitos esverdeados ou cinzentos e siltitos rosados em camadas tabulares delgadas. Ocorre também menor quantidade de intercalações tabulares delgadas de evaporitos (gypsita) e de carbonatos finos maciços. São freqüentes os veios centimétricos de gypsita associados aos bancos de evaporitos. Assim como a unidade inferior, esta unidade também deve representar ambiente litorâneo com transporte tracional de areia em regime de fluxo inferior baixo e médio, periodicamente arraseado e salino dando origem a evaporitos e carbonatos. Ponce et al. (2002) também

interpretam o topo da Formação Rayoso como depósitos de lago salino raso. Já Leanza (2003) interpreta os arenitos no topo da unidade como fluviais.

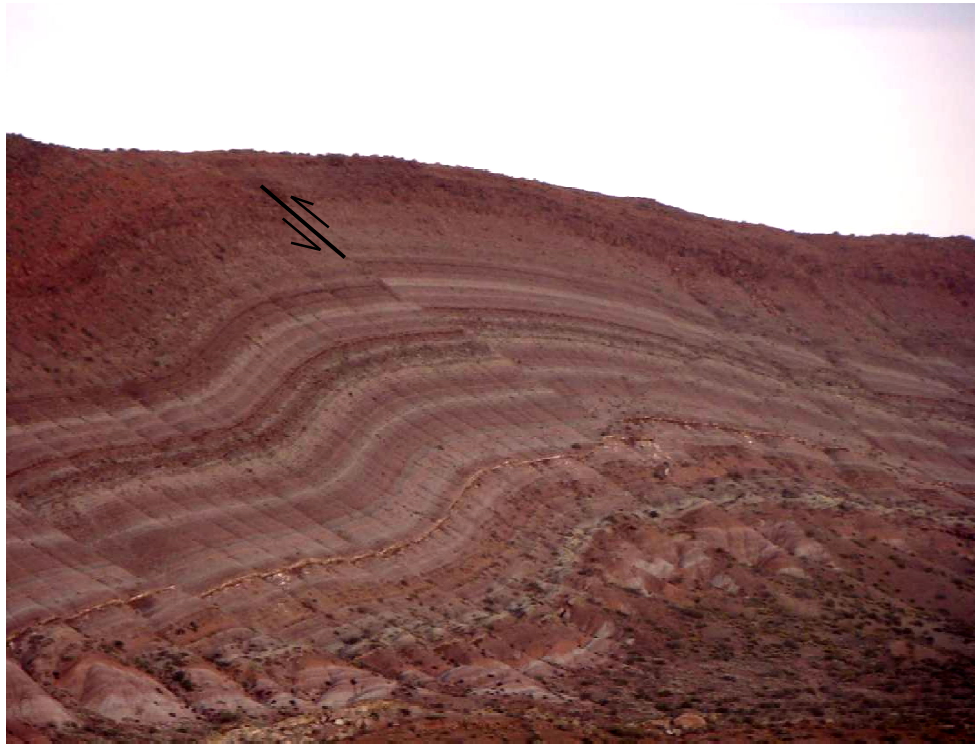


Figura 46. Unidade superior da Formação Rayoso no norte da área. Na base predomina pelito, na parte média proporções semelhantes de arenitos e pelitos, no topo bancos de arenito. Na foto se destaca um banco de evaporito e falha reversa cortando um anticlinal suave.

4.2.4. Formação Candeleros - Grupo Neuquén

A Formação Candeleros reconhecida por Kidel (1927; apud Garrido, 2010) é formada por depósitos de arenitos continentais de coloração vermelha que se assentam em discordância angular sobre os depósitos da Formação Rayoso. Não foram levantados perfis estratigráficos, o que dificulta a interpretação paleoambiental dessa formação. Entretanto, Garrido (2010) realizou um estudo detalhado e relacionou esses depósitos a um ambiente fluvial de tipo entrelaçado com planícies de dunas eólicas marginais.

Esses depósitos formam uma serra extensa de rumo norte-sul que abrange toda a porção leste da área. Pela forte variação de cor entre seus estratos inferiores e superiores foi possível dividir a formação em duas unidades.

4.2.4.1. Formação Candeleros - Unidade Inferior

A unidade inferior deste grupo aparece em discordância angular sobre a Formação Rayoso (Fig. 47). É constituída por uma sucessão com cerca de 70 metros de espessura de arenitos avermelhados médios a grossos, moderadamente selecionados, com pouca matriz siltica avermelhada. Estes arenitos constituem camadas lenticulares delgadas (1-10cm) com laminação plano paralela ou micro-laminação cruzada e camadas médias (10-30cm) e espessas (30-100cm) com estratificação cruzada planar e acanalada, predominando as ultimas (Fig. 48). Arenitos com laminação plano-paralela gradam ou se associam a fácies com marcas de onda, indicando regime de fluxo inferior baixo. A estrutura laminar também ocorre em arenitos grossos com intraclastos e base erosiva, provavelmente registrando transporte de areia em regime de fluxo superior (>15cm/seg). Localmente ocorrem intercalações de arenito maciço em camadas delgadas, arenito seixoso e conglomerado com seixos de arenitos, pelitos e vulcanitos (Fig. 49) em lentes espessas, e lentes delgadas de rochas carbonáticas (concreções ?).



Figura 47. Arenitos avermelhados da base do Grupo Neuquén em discordância angular sobre a unidade de topo da Formação Rayoso. Serrote 1 km a leste do Cerro Rayoso.



a



b

Figura E48. Estratificação cruzada de pequeno (a) e médio (b) portes em arenitos na base do Grupo Neuquén.



Figura 49. Conglomerado polimítico sobre lente delgada de rocha carbonática. Fácies locais na base do Grupo Neuquén.

4.2.4.2. Formação Candeleros - Unidade Superior

Com cerca de 200 metros de espessura esta unidade se assenta em contato gradacional sobre a unidade inferior. A transição é marcada essencialmente pela cor vermelha mais escura nos arenitos da unidade superior e mais clara nos arenitos inferior. As cores parecem fornecidas pela matriz síltica ferruginosa e tingimento do arcabouço dos arenitos, foram úteis na interpretação das imagens usadas no trabalho (Fig. 50).

Na unidade superior da Formação Candeleros ocorrem facies semelhantes as da unidade inferior, ou seja, arenitos com laminação plana, com marcas de onda de crista curva (microlaminação cruzada) e com estratificação cruzada. Nos locais estudados parece predominar a fácies com estratificação cruzada (Fig. 51).



a



bFigura 50. Formação Candeleros – a unidade inferior em tom vermelho claro cobrindo Formação Rayoso e sobreposta pela unidade superior em tom vermelho escuro (a). As

unidades inferior e superior da Fm. Candeleros, e no serrote ao fundo os arenitos claros da Formação Huicul (b).



Figura 51. Estratificação cruzada em arenito grosso na unidade superior da Formação Candeleros.

4.2.4.3. Formação Huicul - Grupo Neuquén

A Formação Huicul (Kiedel, 1927; apud Garrido 2010) é muito bem destacada nas imagens de satélite utilizadas no trabalho, sendo constituída de arenitos esbranquiçados (Fig. 52). Nos poucos afloramentos visitados os arenitos formam camadas lenticulares médias a espessas com estratificação cruzada acanalada, agrupadas em estratos com até alguns metros de espessura, separados por fácies aparentemente maciças. Rentería e Sanchez, 2008 (apud Garrido 2010) interpretam esses depósitos como formados em ambiente fluvial de alta sinuosidade.

5. Geologia estrutural

Na área ocorrem estruturas geradas em regime tectônico compressivo de crosta rasa que deformaram rochas sedimentares formando dobras em caixa, em *chevron* e dobras abertas e suaves. Também ocorre um conjunto de falhas reversas associado ao dobramento, que faz parte de um sistema de falhas regional, o Sistema de Falhas Salado (cf. Cobbold & Rosselo, 2003).

5.1 Dobras

As dobras têm extensões até quilométricas, planos axiais íngremes de traço NNE-SSW e eixos caindo suavemente para NNE ou SSW. Ocorrem braquianticlinais em caixa, sinclinais suaves a abertos e anticlinais e sinclinais em *chevron*, apertados. A estrutura mais notável é o braquianticlinal em caixa do Cerro Rayoso, com vergência para oeste (Figs. 52 e 53). Estas dobras ocorrem preferencialmente na Formação Agrio. Para o topo, nas formações superiores, o dobramento se torna mais suave e as charneiras mais arredondadas. Um exemplo é o flanco leste do Cerro Rayoso onde as unidades acima da Formação Agrio não acompanham a dobra caixa definida nesta formação (Fig. 53a). Da mesma forma, no flanco oeste da estrutura, um grande anticlinal em caixa passa para o topo a um sinclinal suave. Na figura 54 são mostrados pólos de planos de acamamento porém, sem discriminar os domínios com dobras em caixa, em *chevron* e com dobras suaves.



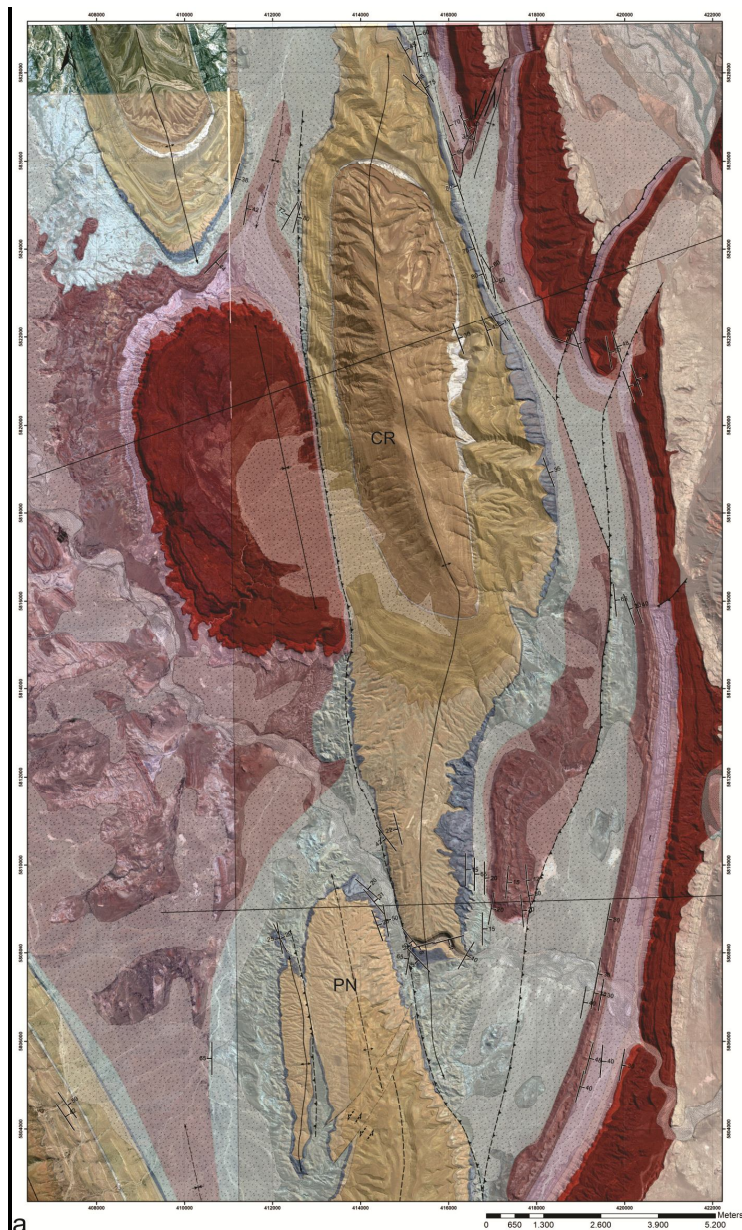
a



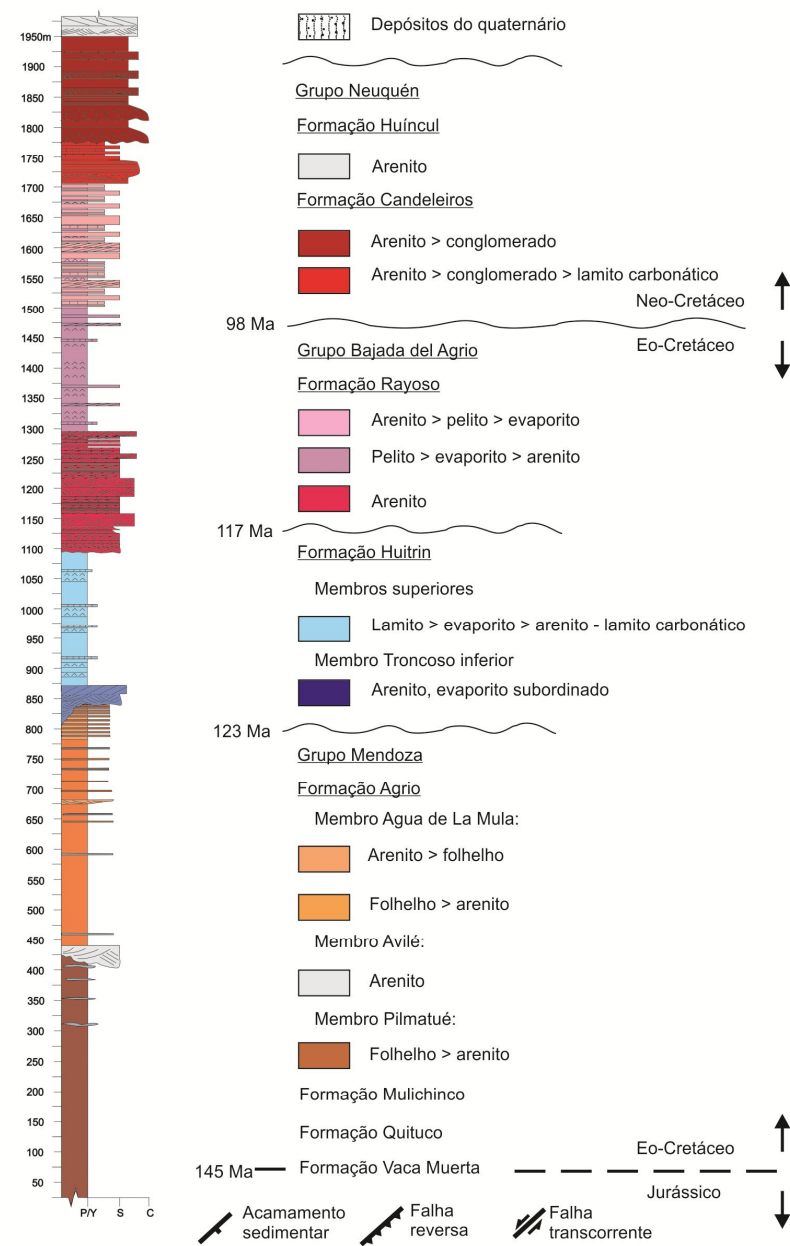
b

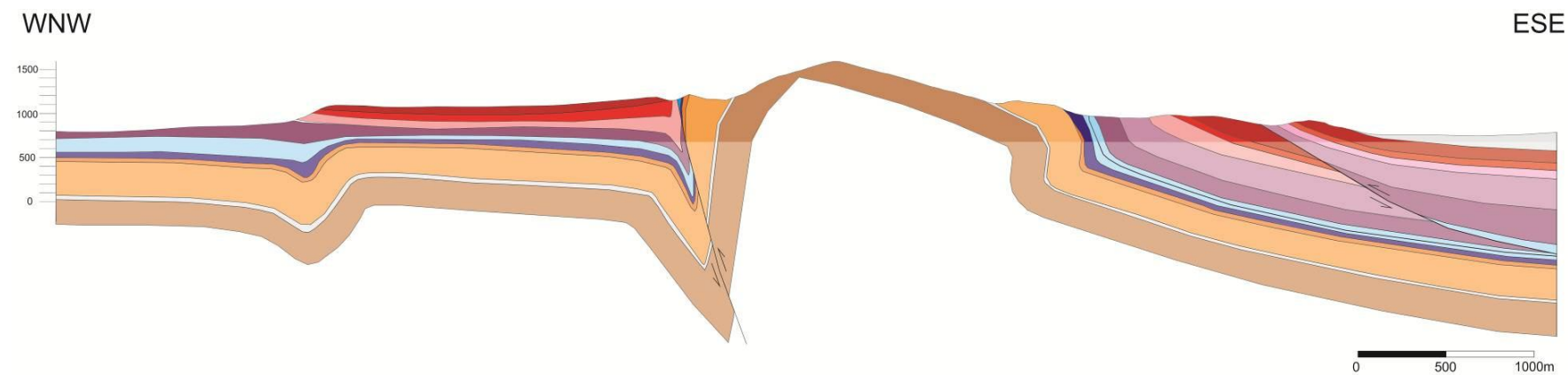
Figura 52. Flanco oeste do braquianticlinal em caixa do Cerro Rayoso com aparente vergência para oeste (a) e camadas reviradas no flanco leste da estrutura (b).

Como visto, a deformação do conjunto não é homogênea. Segundo Cobbold e Rossello (2003) a deposição dos grupos Bajada del Agrio (Formações Huitrín e Rayoso) e Neuquén é sintectônica, o que explicaria a atenuação da deformação nestas unidades. As camadas da Formação Agrio, depositadas em ambiente retro-arco, já estariam litificadas durante a deformação. Nesta unidade e na base da Formação Huitrín ocorrem dobras em *chevron* (Fig. 55) interpretadas como sendo formadas por um mecanismo que envolve deslizamento flexural (Fig. 56), brechas de falha paralelas ao acamamento (Fig. 57) e superfícies com ressaltos e estrias (Fig. 58). Estas estruturas indicam que o principal mecanismo de deformação foi dobramento flexural. Em contraste, as unidades mais jovens consideradas, respectivamente, depósitos das fases de transição retro-arco – ante-país e de ante-país, registram deformação cada vez mais suave para o topo (Fig 53b).

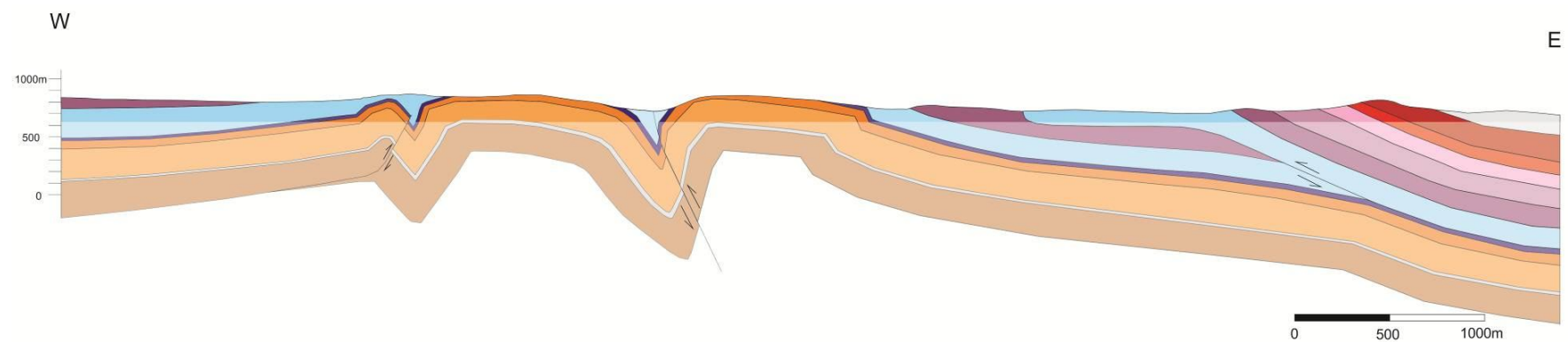


a





Seção A



Seção B

(b)

Figura 53. Mapa geológico no *datum Campo Inchauspe* (a) e seções geológicas transversais as principais estruturas da área (b).

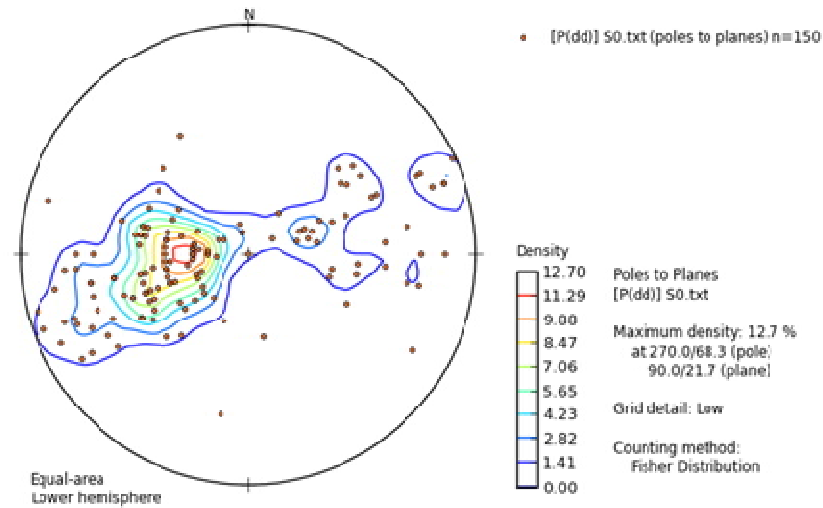


Figura 54. Estereograma de igual área, hemisfério sul, mostrando pólos de planos de acamamento, sem discriminar tipos de dobras – suaves, *chevron* e caixa.



Figura 55. Dobras fechadas em *chevron* em siltito carbonático na base da Formação Hutrín.

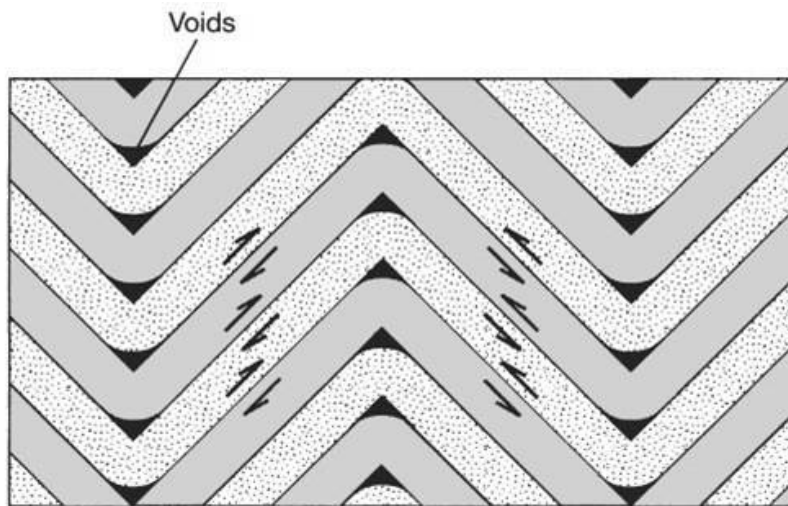


Figura 56. Modelo teórico para dobramento em *chevron* produzido pelo mecanismo de *flexural slip*, segundo Twiss and Moores (2006).



Figura 57. Brecha paralela ao acamamento em siltito carbonático na base da Formação Hutrín.



Figura 58. Superfície paralela ao S0 com ressaltos, estrias e fibras de carbonato, em pelito carbonoso da Formação Agrio. As estruturas lineares orientam-se no sentido do mergulho do acamamento.

5.2 Falhas

Na área existe um conjunto de falhas de orientação N-S a NE-SW que faz parte do Sistema de Falhas Salado. A falha principal tem traço sinuoso N-S, ora é paralela, ora corta o acamamento e aproveitou camadas de gesso da Formação Huitrín (Fig. 59). O rejeito é reverso e de ordem até quilométrica (Fig. 53b). Localmente existem evidências de deslocamento oblíquo, transcorrente sinistral.

No sul da área uma ramificação NNE da falha principal empurrou o braquianticlinal do Cerro Rayoso sobre o anticlinal Pichi Neuquén, cortando um sinclinal *chevron* entre os dois anticlinais (Fig. 53). O rejeito reverso nessa falha varia lateralmente de dezenas até centenas de metros (Fig 53b).



Figura 59. A falha principal da área com alto mergulho local para leste, colocando em contato camada de gesso da Formação Huitrín sobre arenito da Formação Rayoso.

No norte da área a falha principal se ramifica em mais três falhas de rejeito menor e traço NE-SW, formando um feixe do tipo rabo de cavalo (*horse tail*). Nesse feixe, as duas falhas do sul mergulham com baixo ângulo para sudeste e têm componente principal reverso e/ou transcorrente sinistral. A terceira falha, a norte das duas ultimas, mergulha para noroeste (Fig. 60). Considerando o rejeito aparente em planta e o sentido de mergulho do plano da falha, constata-se que esta não pode ter um componente principal reverso, teria que ser normal ou transcorrente sinistral. Nas duas falhas a sul os rejeitos aparentes em mapa também poderiam ser produzidos por componente transcorrente sinistral. Logo, interpretamos essa terminação do feixe no norte da área como uma falha oblíqua reversa com componente principal transcorrente sinistral. Assim, podemos inferir um componente sinistral no Sistema de Falhas Salado, além do reverso já conhecido.

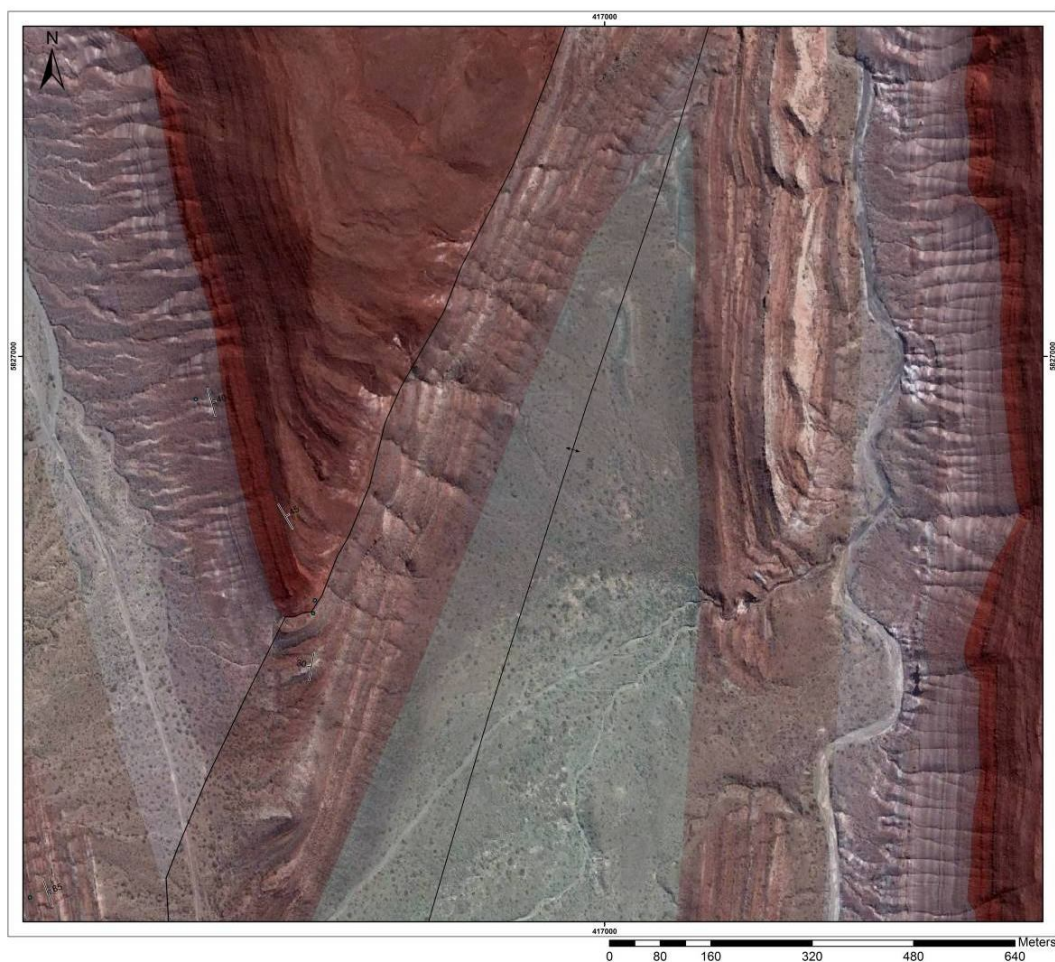


Figura 60. Detalhe do mapa geológico mostrando falha normal ou transcorrente sinistral com componente secundário reverso, deslocando unidades das formações Huitrín, Rayoso e do Grupo Neuquen.

5.3. Juntas e veios

Devido ao escasso tempo de trabalho de campo não foi possível estudar com detalhe as juntas e os veios. Ocorrem pares conjugados de fraturas de alto ângulo e discretas zonas de cisalhamento em escala de afloramento definidas por *tension veins*.

Os pares conjugados de fraturas têm rumo em torno de N15E e N70E indicando compressão NE-SW (Fig 61). As zonas de cisalhamento ocorrem em pares conjugados na charneira do anticlinal Pichi Neuquen A envoltoria de cisalhamento dos veios destrais tem direção NE-SW (~ N45E), a dos veios sinistrais têm direção E-W (~ N85E; Fig. GE12), o conjunto indica compressão, aproximada, na direção ENE-WNW.



Figura 61. Par conjugado de fraturas de alto ângulo com rumo N15E e N70E ao lado da falha principal da área de rumo N-S. Arenito Rayoso na parte central da área.

5.4 Fases de deformação

Cobbold e Rossello (2003) definiram três fases de deformação na Bacia Neuquén. A primeira fase, denominada Peruviana ocorreu final do Cretáceo. Foi uma compressão aproximadamente E-W, responsável pela maior parte do encurtamento na bacia. Formaram-se sistemas de falhas reversas com traço N-S e dobras associadas, como o Sistema de Falhas Salado. Esta compressão, gerada por subdução rasa da Placa de Nasca, deu origem a fase de ante-país na Bacia Neuquén.

A segunda fase, denominada Inca, ocorreu no Paleogeno. Foi interpretada como uma transpressão que gerou cisalhamento destrai paralelo ao orogeno, sob tensor principal de stress nordeste. Segundo os autores, o encurtamento crustal foi modesto.

A terceira fase começou Neogeno, ainda está ativa e é interpretada por Cobbold e Rossello (2003) como produto de uma compressão E-W. Entretanto, não há registro desta fase no Cinturão Agrio.



a



b

Figura 62. Zonas de *tension veins* nordeste-sudoeste e leste-oeste (paralela ao martelo) indicando cisalhamento dextral e sinistral, respectivamente (a). Detalhe de veio na zona dextral (b).

Uma interpretação preliminar permite chegar a dois sets de tensores. Na área mapeada, planos axiais íngremes de traço NNE-SSW, estrias *down-dip* com caimento para ENE e WSW nos flancos das dobras e zonas de cisalhamento destrais N45E e sinistrais N85E nos permite inferir um tensor ENE-WSW. Este tensor corresponderia ao que Cobbold e Rossello (2003) consideram a primeira fase de deformação ou fase Peruviana. Os pares conjugados de fraturas N15E e N70E em zonas de falhas representariam um tensor NE-SW, que corresponde a segunda fase, Inca, interpretada como transpressiva e responsável pela reativação de falhas na área. Entretanto, para gerar os componentes sinistrais observados nas falhas de rumo NE (*horse tail* no norte da área; Fig. 53a), a orientação do tensor seria mais próxima do norte do que os traços das falhas ou, o movimento esperado seria o oposto, destral (Fig. 63). A figura 64 relaciona as fases de deformação com as principais estruturas observadas na área.

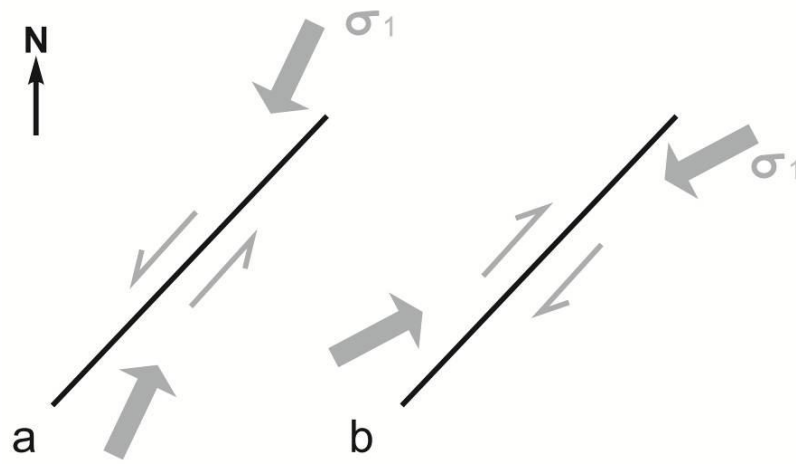


Figura 63. Movimentos esperados em reativação de falhas de traço NE-SW por compressão NE - SW. Notar que tanto em (a), quanto em (b) a direção de compressão máxima é nordeste-sudoeste. Entretanto, uma pequena variação nessa direção provocaria mudança de sentido de movimentação na falha

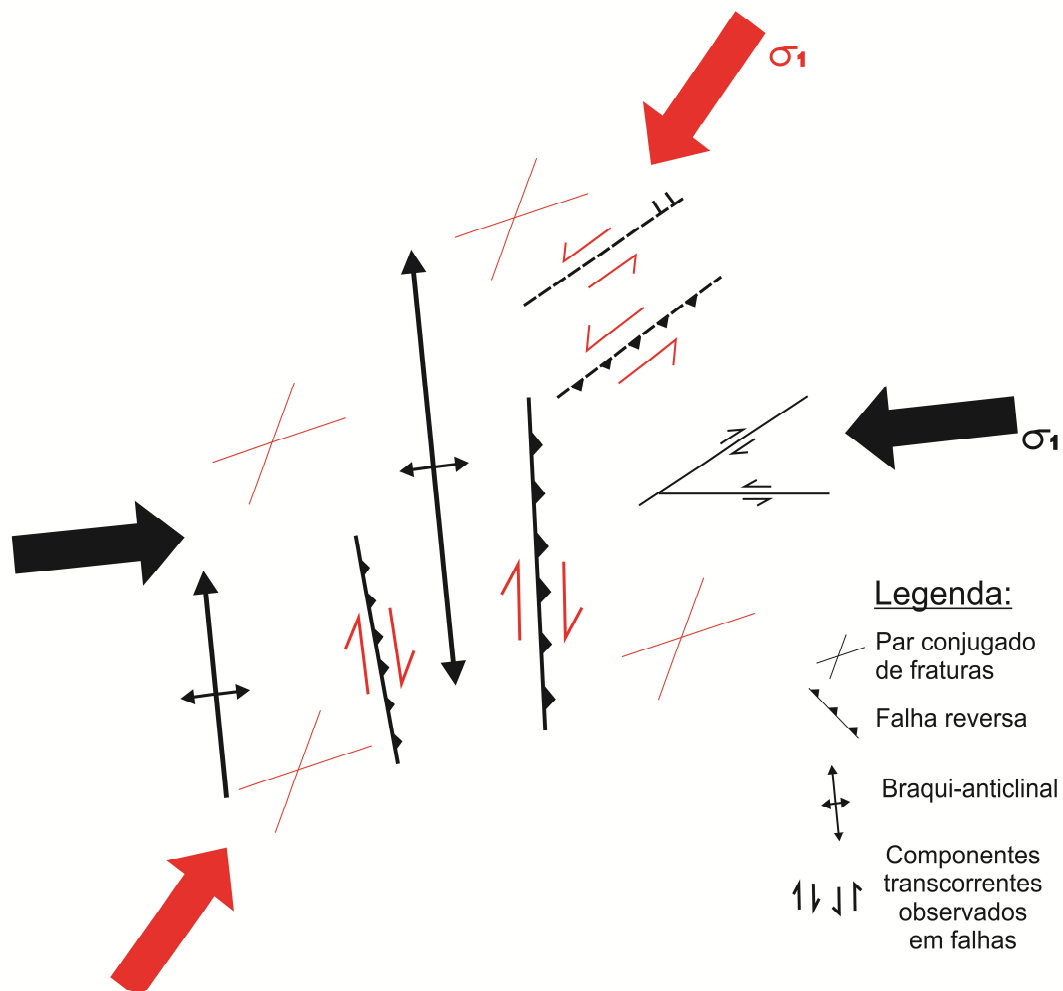


Figura 64. Modelo simplificado mostrando a origem das principais estruturas da área em relação às duas fases de deformação. Em preto se encontram as estruturas formadas durante a primeira fase de deformação (σ_1 aproximadamente E-W) e em vermelho encontram as estruturas e reativações originadas na segunda fase NE-SW.

6. Conclusões e discussão

Os trabalhos de campo incluindo geologia estrutural e sedimentar, apoiados por geoprocessamento e fotogeologia, permitiram o reconhecimento e cartografia de doze unidades sedimentares cretáceas da Bacia Neuquén, expostas na área do Cerro Rayoso e adjacências na pre-cordilheira andina ao sul de Chos Malal.

As técnicas de geoprocessamento e interpretação de imagens utilizadas na preparação para o campo revelaram-se, no tipo de área estudada, importantes ferramentas para o mapeamento geológico feito com poucos dias de campo. Entre estas técnicas, destaca-se metodologia desenvolvida neste trabalho para o cálculo de atitude de camadas a partir de análise de *dip-slope* em imagem de satélite e modelo digital de elevação. A metodologia promete ser útil para mapeamento em áreas desérticas. Entretanto para se tornar uma ferramenta prática e rápida ainda é necessário desenvolver uma rotina padrão para automatizar o processo no software ArcGIS.

As doze unidades mapeadas fazem parte da Formação Agrio, Grupo Mendoza, formações Hutrín e Rayoso do Grupo Bajada del Agrio e das formações Rio Limay e Huincul do Grupo Neuquén. As interpretações paleoambientais foram coerentes com aquelas apresentadas na bibliografia. Entretanto, houve um refinamento dos contatos entre as unidades e as seguintes novidades, em relação aos trabalhos prévios:

- divisão do Membro Agua de La Mula, Formação Agrio, em duas unidades mapeáveis;
- divisão da Formação Candeleros, Grupo Neuquén, em duas unidades mapeáveis e,
- mapeamento de três unidades na Formação Rayoso, que nos mapas prévios constitui apenas uma unidade.

Nos trabalhos prévios adovaga-se duas fases de deformação na área, uma compressiva E-W Neocretácea e outra transpressiva com tensor principal NE-SW no Mioceno. Com os dados obtidos uma extrapolação preliminar permite chegar a dois sets de tensores. A primeira fase seria resultado de uma compressão ENE-WSW que gerou dobras com planos axiais íngremes de traço NNE-SSW, estrias *down-dip* com caimento ENE e WSW nos flancos, além de zonas de cisalhamento destrais N45 e sinistrais N85. A segunda fase poderia ser representada por pares conjugados de fraturas N15E e N70E em zonas de falhas correspondendo a um tensor NE-SW.

Os componentes sinistrais inferidos nas falhas NE (*horse tail* no norte da área), mostram que a orientação do tensor sigma 1 seria mais próxima do norte do que os traços das falhas ou o movimento esperado seria o oposto, destral. Este movimento seria uma reativação nas falhas da primeira fase ou existiria uma terceira fase de deformação

(?). Uma destas falhas NE apresenta mergulho para NW e componente principal normal ou sinistral mas, tradicionalmente tem sido mapeada como uma falha reversa mergulhando para SE. O componente normal é incompatível com as duas fases de deformação propostas na bibliografia. O componente sinistral teria compatibilidade restrita com a segunda fase de deformação pois a direção de compressão teria de ser mais próxima do norte do que o traço da falha.

7. Referências Bibliográficas

- Aguirre Urreta, M.B. & Rawson, P.F., 1997. The ammonite sequence in the Agrio Formacion (Lower Cretaceous), Neuquén Basin, Argentina. *Geological Magazine* 134: 449-458.
- Cobbold, P.R. & Rossello, E.A., 2003. Aptian to recent compressional deformation, foothills of the Neuquén Basin, Argentina. *Marine and Petroleum Geology*: 429-443.
- Garrido, A.C, 2010. Estratigrafía del Grupo Neuquén, Cretácico Superior de la Cuenca Neuquina (Argentina): nueva propuesta de ordenamiento litoestratigráfico. *Revista del Museo Argentino de Ciencias Naturales*. vol.12 no.2 Ciudad Autónoma de Buenos Aires dic. 2010.
- Giambiagi, L., Bechis, F., García, V., Clark, A. H., 2008. Temporal and spatial relationships of thick- and thin-skinned deformation: A case study from the Malargüe fold-and-thrust belt, southern Central Andes. *Tectonophysics* 459 (2008) 123–139.
- Grohmann, C.H., Campanha, G.A.C. & Soares Junior, A.V., 2011. OpenStereo: um programa Livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: XIII Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos.
- Howell J. A., Schwarz, E., Spalletti, L. A. & Veiga, G. D. The Neuquén Basin: an overview - from: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J. A & Schwarz, E. (eds) 2005. *The Neuquén Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics*. Geological Society, London, Special Publications, 252, 1-14. - The Geological Society of London 2005.
- Leanza, H. A., 2003. Las sedimentitas huirinianas y rayosianas (Cretácico inferior) en el ámbito central y meridional de la cuenca Neuquina, Argentina. *Servicio Geológico Minero Argentino, Serie Contribuciones Técnicas - Geología 2* : 1-31. Buenos Aires.
- Leanza, H.A., Repol, D., Sruoga P., Salvarredy Aranguren, M. 2002. Nuevas unidades estratigráficas del Mesozoico y Cenozoico de La Comarca de Huncal, Provincia del Neuquén, Argentina. *Actas Del XV Congreso Geológico Argentino*. El Calafate, 2002.
- Ramos, V.A. y Folguera, A., 2005b. Los Andes Australes: una evolución tectónica excepcional entre el sur de Mendoza y el norte de Neuquén. *Sexto Congreso de*

- Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Archivos Electrónicos, Mar del Plata.10p.
- Rossi, G. & Masarik, C., 2002. Acumulacion de hidrocarburos em areniscas eólicas. Un ejemplo Del Hauteriviano de la cuenca neuquina, Argentina. V Congreso de Exploración de y Desarrollo de Hidrocarburos. Actas CD-room, Mar del Plata.
- Twiss, R. J. & Moores, E. M. 2006. Structural Geology second edition. W. H. Freeman and Company, New York.
- Uliana, M. A., Legarreta, L., Laffitte, G. A. y Villar, H. J., 1999. Estratigrafía y geoquímica de las facies generadoras de hidrocarburos en las cuencas petrolíferas de Argentina. 4º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 1 : 1- 61. Mar del Plata.
- Veiga, G.D., Howell, J.A. & Stromback, A., 2005. Anatomy of a mixed marine-non-marine lowstand wedge in a ramp setting. The record of a Barremian-Aptian complex relative sea level fall in the central Neuquén Basin, Argentina. In: Veiga, G. D., Spalletti, L. A., Howell, J.A.& Schwarz, E. (eds) 2005. The Neuquen Basin, Argentina: A Case Study in Sequence Stratigraphy and Basin Dynamics. Geological Society, London, Special Publications, 252, 139–162.
- Vergani, G., Tankard, A., Belotti, H. & Welsink, H., 1995. Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin Argentina. In: TANKARD, A.J., Suárez, R. & Wwlsink, H.J. (eds), Petroleum Basins of South America. AAPG Memoirs, 62, 383 402.
- Wilson & Gallant, 2007. Terrain Analysis, Principles and Aplications. John Wiley & Sons.
- Weaver, Ch. 1931. Paleontology of the Jurassic and Cretaceous of west central Argentina. Memoir University Washington 1: 10469, Seatle.
- Yagupsky, Daniel L. . (2009). Metodología para el estudio de sistemas compresivos y de sus controles estructurales. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Zapata, T., Córscico, S., Dzelajica, F. & Zamora, G., 2002. La faja plegada y corrida del Agrio: Análisis estructural y su relación con los estratos terciarios de la Cuenca Neuquina Argentina. V8 Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos (Mar del Plata), Actas. IAPG, Buenos Aires. electronic files.

Zapata T. & Folguera A., 2005. Tectonic evolution of the Andean Fold and Thrust Belt of the southern Neuquén Basin, Argentina. from: Veiga, G.D., Spalletti, L. A., Howell, J. A. & Schwarz, E. (eds) 2005. The Neuquén Basin, Argentina.